Experimentelle Prüfung

der durch verschiedene Messungsanordnungen in einem homogenen elektrischen Felde hervorgerufenen Störungen (Deformationen) der Niveauflächen.

Von der

K. Technischen Hochschule zu München

zur Erlangung der Würde eines

DOKTORS DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

genehmigte Dissertation.

Vorgelegt von

Karl Hoffmann,

Assistent am physikal. Institut der Techn. Hochschule München.

Referent:
Prof. Dr. Hermann Ebert.

Korreferent:
Prof. Dr. Oskar Knoblauch.

München 1911.

Kgl. Hof- und Universitäts-Buchdruckerei von Dr. C. Wolf & Sohn.

Experimentelle Prüfung

der durch verschiedene Messungsanordnungen in einem homogenen elektrischen Felde hervorgerufenen Störungen (Deformationen) der Niveauflächen.

Von der

K. Technischen Hochschule zu München

zur Erlangung der Würde eines

DOKTORS DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

genehmigte Dissertation.

ACAD. LAUR. BAT. BIBL.

Vorgelegt von

Karl Hoffmann,

Assistent am physikal. Institut der Techn. Hochschule München.

Referent:
Prof. Dr. Hermann Ebert.

Korreferent:
Prof. Dr. Oskar Knoblauch.

München 1911.

Kgl. Hof- und Universitäts-Buchdruckerei von Dr. C. Wolf & Sohn.

Dem Andenken meines Vaters

in dankbarer Liebe und Ehrfurcht

gewidmet.

Inhalt.

Seite

Einleitung: Ziel der Arbeit 7

Apparatanordnung 11

Fehlerquellen 15

Untersuchungen 27

I. Untersuchungen, die Messanordnungen zur Ermittlung des Potentialgefälles betreffen 27

II. Untersuchungen, die sich auf Apparate beziehen, welche zum Messen der luftelektrischen Zerstreuung bezw. Leitfähigkeit dienen 54

III. Der Drachen und das Luftschiff im homogenen elektrischen Feld 63

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555409_0083

Einleitung.

Die Luftelektriker waren in den letzten Jahren eifrig an der Arbeit, ihre qualitativen Untersuchungen des elektrischen Zustands der Atmosphäre mehr und mehr quantitativ zu gestalten. Mit einem solchen Übergang vom Qualitativen zum Quantitativen muss natürlich eine gründliche experimentelle wie theoretische Revision des Instrumentariums Hand in Hand gehen. Nur ein eingehendes Studium der verwendeten Messanordnung, insbesondere ein gewissenhafter Vergleich ihrer Angaben mit den in wohldefinierten Fällen theoretisch geforderten Werten lässt einen Schluss auf den quantitativen Wert eines gemessenen Faktors zu.

Bei fast allen luftelektrischen Messungen spielt das elektrische Feld, welches um die Apparatur im Erdfeld spontan entsteht, oder welches in den Apparaten künstlich erzeugt wird, eine grosse Rolle.

Bisweilen sind durch nicht genügende Kenntnis oder Beachtung des Verlaufs der Niveauflächen (Äquipotentialflächen) solcher Felder kostspielige und äusserst notwendige Versuche wertlos geworden. Man braucht sich nur der früheren Potentialgefällemessungen im Freiballon zu erinnern, um eine passende Illustration zu diesem Satz zu haben.

Solange sich die luftelektrischen Untersuchungen in qualitativen Bahnen bewegten, tat das durch das Studium weniger gerechneter einfacher Beispiele gepflegte Gefühl zur Bestimmung des Verlaufs der Niveauflächen und damit der im Thema genannten Störungen gute Dienste. Mit den raschen Fortschritten jedoch, welche die luftelektrische Forschung im letzten Dezennium zu verzeichnen hatte, hielt

dieses Gefühl nicht Schritt, so dass ein unsicheres Tasten in dieser Beziehung während der letzten Jahre nicht selten war.

Es ist also sicher zeitgemäss und äusserst nützlich, durch Untersuchungen charakteristischer und praktisch wichtiger Felder an Stelle des individuellen Gefühls in jedem einzelnen Falle das Experiment oder die Rechnung sprechen zu lassen.

Die Resultate solcher Untersuchungen müssen

1. entweder die Mittel an die Hand geben, die in der luftelektrischen Forschung praktischen, aber mit gewissen Fehlern behafteten Messverfahren auf den Idealfall zu reduzieren oder
2. Antwort auf die Frage erteilen, wie und wohin man seine Messanordnung zu bauen hat, damit eine solche Reduktion nicht mehr nötig ist.

Es ist in dieser Hinsicht schon manches für die luftelektrische Forschung geleistet worden.

So haben O. E. Schiötz,[1]) F. Linke,[2]) und H. Benndorf[3]) das Problem für den im Erdfeld schwebenden Kugelballon unter der Voraussetzung, dass derselbe durch ein Rotationsellipsoid ersetzt werden darf, rechnerisch angegriffen und zum Teil in dankenswertester Weise gelöst. Auch hat Benndorf durch Identifizierung einer Anzahl von Gebilden (geerdete Stangen, spitze Türme u. s. w.) mit Rotationsellipsoiden noch vieles Brauchbare herausgebracht, aber abgesehen davon, dass eine solche Substitution als etwas Gezwungenes erscheinen muss, sind solche Rechnungen so beschwerlich, dass sie in vielen Fällen nicht verwendbar sind. Aus diesem Grunde

---

[1]) O. E. Schiötz, Einige Bemerkungen, welche man aus den durch Ballone ausgeführten Beobachtungen über die Luftelektrizität ziehen kann. Vidensk. Skrifter, mathem. naturw. Klasse, Nr. 8, Christiania 1898.

[2]) F. Linke, Luftelektrische Messungen bei zwölf Ballonfahrten, Abhandlungen der Göttinger Gesellschaft der Wissenschaften, mathem. phys. Klasse, Neue Folge, III. Nr. 5, 1904.

[3]) H. Benndorf, Über gewisse Störungen des Erdfeldes mit Rücksicht auf die Praxis luftelektrischer Messungen, Sitzungsber. der Wiener Akademie, mathem. naturw. Klasse 115, Abt. IIa, 425, 1906.

mussten sich auch die genannten Forscher auf das Studium der elektrischen Grössen in wenigen gerade interessierenden Feldpunkten spezieller Lage beschränken. Von einer Darstellung des Gesamtfeldes kann bei ihnen praktisch nicht die Rede sein.

Man versuchte daher auf experimentellem Weg Einblick in die fraglichen elektrischen Felder zu gewinnen.

Maxwell[1]) hatte bereits am Ende des dritten Kapitels seines Treatise in einem Abschnitt über „Beziehungen zwischen Körpern, die in ihrer Form oder in ihrer Ladung sich ähnlich sind“ die theoretische Grundlage gegeben.

Es sei erlaubt, das für die vorliegende Arbeit Wichtige aus diesem Abschnitt anzuziehen.

Vorausgesetzt seien zwei Systeme, die einander geometrisch ähnlich sind, d. h. korrespondierende Strecken sollen in ihnen überall in demselben Verhältnis L : l stehen. Die Leiter in beiden Systemen seien durch dasselbe Dielektrikum voneinander getrennt.

Sind dann die Elektrizitätsmengen auf zwei entsprechenden Elementen A und a beider Systeme gleich E und e, so ist das Potential von A auf ein anderes Element B des ersten Systems gleich $V = E/\overline{AB}$ und das Potential von a auf ein dem B entsprechendes Element b: $v = e/\overline{ab}$.

Da aber: $\overline{AB} : \overline{ab} = L : l$, so folgt

$$E : e = L \cdot V : l \cdot v.$$

Diese Gleichung lehrt das Verhältnis der Ladungen entsprechender Teile der beiden Systeme kennen, wenn

1. diese Systeme geometrisch ähnlich sind, also entsprechende Strecken sich wie L : l verhalten,
2. die Dielektrika in beiden Systemen dieselben sind, und
3. die Potentiale an entsprechenden Stellen in der Proportion von V : v stehen.

---

[1]) J. Cl. Maxwell, Treatise I, § 94, Deutsche Übersetzung von B. Weinstein 1883, S. 117.

Aus dem Verhältnis der Gesamtladungen ergibt sich sofort das Verhältnis der spezifischen Ladungen; d. h. der Dichten

$$S : s = V/L : v/l.$$

Es ist also nur nötig, die gesuchten elektrischen Grössen an einem Modell, das in einem gewissen Masstab angefertigt ist und in einem künstlichen homogenen Feld von bestimmter Begrenzung und Intensität sich befindet, zu untersuchen, um alsdann vermöge der obigen Gleichungen, in denen das Prinzip der elektrischen Ähnlichkeit mathematisch formuliert ist, sofort auf die wirklichen Verhältnisse schliessen zu können.

Zur Orientierung über den elektrischen Zustand in der Nähe des Modells kann man entweder die elektrische Flächendichte s auf demselben feststellen und daraus das in der Nähe des Körpers herrschende Potentialgefälle dV/dn aus der Coulomb'schen Gleichung:

$$dV : dn = 4 \cdot \pi \cdot s$$

berechnen, oder aber dV/dn experimentell bestimmen, um dann s durch die Rechnung zu erhalten.

Beide Wege sind versucht worden, der erste mit negativem Erfolg. So schreibt Benndorf[1]): „Versuche, die in dieser Richtung im hiesigen physikalischen Institut angestellt worden sind, haben gezeigt, dass solche Dichtemessungen mit ungewöhnlichen Schwierigkeiten verbunden sind und kaum vollkommen einwandfrei auszuführen sein dürften."

Mit der Bestimmung des Potentialgefälles dagegen war man glücklicher. C. W. Lutz[2]) ermittelte als der Erste im Jahre 1906 die Deformation der im homogenen Feld parallelen Niveauflächen durch den von ihm konstruierten Flammenkollektor.

[1]) H. Benndorf, Über die Störungen des normalen atmosphärischen Potentialgefälles durch Bodenerhebungen, Sitzungsber. der Wiener Akademie, mathem. naturw. Klasse 109, Abt. IIa, 923, 1900, S. 5.

[2]) C. W. Lutz, Über einen Flammenkollektor und dessen Prüfung im elektrischen Felde, Sitzungsberichte der Bayerischen Akademie, math. naturw. Klasse, 36, 507, 1906.

Zwei Jahre später haben Ebert und Lutz[1]) das Modell eines Freiballons im homogenen Feld auf dieselbe Weise untersucht.

Sie verfuhren dabei so, dass sie das fragliche Feld durch einen kleinen das Feld selbst möglichst wenig deformierenden Wasserkollektor abtasteten. Das Ausmessen der sich ergebenden Diagramme lieferte dann die gesuchten Grössen. Diese Methode hat natürlich gegenüber der Dichtemessung noch den Vorteil, dass sie Aufschluss über die Elektrizitätsverteilung im ganzen Feld gibt, während die Dichtemessung nur über das Gefälle in der Nähe des störenden Körpers orientieren würde.

Die Aufgabe des Verfassers war die Anwendung der von Ebert und Lutz begründeten Methode der Felderforschung auf eine grössere Anzahl interessierende Fälle luftelektrischer Messanordnungen.

Apparatanordnung.

(Siehe hiezu die Figuren 1 und 2.)

Das künstliche homogene Feld.

Dasselbe wurde erzeugt zwischen zwei Zinkplatten P und Q (1 m × 2 m), die auf Holzrahmen G und H aufgeschraubt waren. P und Q hatten einen Vertikalabstand von 50 cm und waren durch dicke Paraffinklötze J (10 × 7 × 4 cm) voneinander isoliert. Die untere dieser Platten (P) war stets geerdet, die obere (Q) mit dem positiven Pol einer meist 100—150 zelligen Akkumulatorenbatterie verbunden, deren negativer Pol an Erde lag.

Die Abtaste-Vorrichtung.

Sie bestand aus einem Wasserkollektor K, der nach der Seite des geerdeten Beobachters hin durch eine (in Fig. 1 und 2 nicht gezeichnete) geerdete Weissblechblatte gegen

[1]) H. Ebert und C. W. Lutz, Der Freiballon im elektrischen Felde der Erde, Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre, Bd. II, Heft 5, 183, 1908.

Influenz geschützt war, und einem Elektrometer E. Beide Instrumente waren auf den vertikal verschiebbaren Teil R eines Gestells montiert, welches selbst wieder horizontal (schlittenartig) verschiebbar war. Das Kollektorgefäss, welches einen Liter fasste, hatte etwas oberhalb des Bodens einen seitlichen Ansatz nebst Hahn h. Der Ansatz lief in eine 85 cm lange Sonde S aus (einem Messingrohr von 3 mm Lumen), die aus rein praktischen Gründen (um die Druckhöhe des ausfliessenden Wassers zu steigern) ausserhalb des Feldes die aus den Figuren ersichtliche Gestalt hatte. Der Endpunkt der horizontalen und zu den Feldlängskanten senkrechten Sonde S lag in der vertikalen Längsmittelebene des Feldes. K nebst S war von R mittels eines gerillten, durch Natrium getrockneten Hartgummizapfens F isoliert. Wegen der oben angegebenen vertikalen und seitlichen Verschiebbarkeit des Kollektors war es möglich, das Sondenende mit jedem Punkt der Längsmittelebene zur Coincidenz zu bringen. Die Koordinaten eines solchen Punktes wurden dann abgelesen an zwei Maßstäben, einem horizontalen M (Abszissenmaßstab) und einem vertikalen m (Ordinatenmaßstab).

Als Ausgangspunkt für die Abszissenmaße galt stets das linke Ende des Feldes, als Ursprung der Ordinaten die untere Platte (P).

Die Erdung des Elektrometergehäuses und der übrigen zu erdenden Metallteile des guillotineartigen Gestells geschah durch am Grundbrett angebrachte Schleiffedern, die mit einem geerdeten, am Holzgestell G befestigten Draht Kontakt hatten.

Nicht geringe Schwierigkeiten bot die Konstruktion einer geeigneten

Ausflussöffnung

am Ende der Sonde S. Der Strahl sollte dort (um über die Modelle hinwegspritzen zu können) eine genügende Steifigkeit besitzen, ohne dass dabei der Wasserspiegel in K allzu rasch sank, denn dadurch wurde eine Verlegung des Auflösungspunktes herbeigeführt. Das Lumen der Röhre S durch Aus-

züge allmählich zu verengen, wurde versucht, lieferte aber ein negatives Resultat, da der ohnehin durch das lange Rohr schon arg geschwächte Druck dann so klein wurde, dass die Adhäsion an der Ausflussöffnung sich störend bemerkbar machte. Nach längerem Probieren verfuhr ich folgendermassen: Ich lötete auf das Ende von S ein dünnes Messingblech und durchstach dieses dann mit einer Nähnadel mittlerer Stärke. Der aus diesem kleinen Loch austretende Strahl entsprach allen an ihn gestellten Anforderungen.

Das spannungsmessende Instrument E

bestand aus einem Saitenelektrometer Lutz-Edelmannscher[1]) Konstruktion. Es war für die bei den Verschiebungen, nach rechts und links, oben und unten, notwendig auftretenden Erschütterungen und Neigungen vollkommen unempfindlich. Ganz besonders muss auch noch seine Immunität gegenüber Temperaturschwankungen, die durch eine eingebaute, sorgfältig durch Herrn Dr. Lutz ausprobierte Temperaturkompensation erreicht wurde, erwähnt werden.

Ich verwendete dieses Instrument in der sogen. Doppelschaltung, die man erhält, wenn man die eine der beiden in einem solchen Elektrometer enthaltenen, vom Gehäuse isolierten Schneiden mit der ebenfalls vom Gehäuse isolierten Saite (Wollastondraht von 0,001 mm Durchmesser) verbindet und die zweite Schneide an das geerdete Gehäuse legt. Wird dann die Saite und damit die mit ihr verbundene Schneide geladen, so entfernen sich beide um einen mikrometrisch zu bestimmenden Betrag, der die Grösse der Ladung bezw. ihres Potentials charakterisiert. Dieses Elektrometer, das mir durch die Liebenswürdigkeit des Herrn Dr. Lutz anfangs leihweise überlassen wurde — wofür ich mir auch an dieser Stelle herzlichst zu danken erlaube — hat sich in der vorliegenden Untersuchung durchaus bewährt.

---

[1]) C. W. Lutz, Über ein Saitenelektrometer, physikal. Zeitschrift 9, 3, 100, 1908 und 9, 19, 642, 1908.

Methode der Abtastung.

Um den Verlauf einer Anzahl von Niveauflächen eines Feldes kennen zu lernen, untersuchte ich stets die Schnitte derselben mit der schon oben erwähnten Vertikallängsmittelebene. Diese Schnittfiguren, Niveaulinien genannt, wurden folgendermassen erhalten: Ich suchte in einer Vertikalen, also bei konstantem Abszissenwert, durch Verschiebung des Kollektors nach oben, mit dem Sondenende diejenigen Punkte der Mittelebene auf, die etwa das Potential 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 Volt hatten und tabellierte ihre Ordinaten. Alsdann wurde eine Reihe von anderen Vertikalen gewählt, ihre Abszissen notiert und in jeder derselben die Punkte mit den angegebenen Potentialen ermittelt. Endlich trug ich sämtliche Punkte in Koordinatenpapier ein und verband diejenigen mit den gleichen Potentialwerten durch Kurvenzüge. Die Kenntnis der letzteren gestattet:

1. die Berechnung des Gefälles an irgend einem Ort des Feldschnittes und damit durch Vergleich mit dem an derselben Stelle im ungestörten Feld herrschenden Gefälle die Berechnung der für die Praxis wichtigen Reduktionsfaktoren,
2. die auf ihnen senkrechten Kraftlinien zu zeichnen, deren Kenntnis als Ionenbahnen wichtig ist,
3. nach der schon oben gegebenen Beziehung von Coulomb (unter der Voraussetzung, dass die in derselben vorkommenden Differentiale näherungsweise durch endliche Grössen ersetzt werden dürfen) die elektrische Flächendichte s auf dem Körper zu berechnen,
4. die Berechnung des elektrostatischen Druckes.

Das Aufstellen, Isolieren und Laden der Modelle.

In einer Anzahl von Fällen war die Deformation eines homogenen Feldes durch geerdete, geladene oder isolierte Modelle mit leitender Oberfläche zu untersuchen. Die Modelle wurden dann meist von rückwärts an einem horizontalen

Stahlstab, der ausserhalb des Feldes zwischen zwei Paraffinplatten geklemmt war, in das Feldinnere gehalten (Fig. 2). Diese Paraffinplatten waren zum Überfluss auch noch mit einem Gehäuse umgeben, dessen Inneres Natriumtrocknung erhielt. Die auf solche Weise hergestellte Isolation des Modelles war eine vorzügliche. Sollte das Modell bis zu einem gewissen Potential aufgeladen werden, so wurde es, auf die gleiche Weise wie hier beschrieben, isoliert, und dann der eine Pol einer Hilfsbatterie, deren anderer Pol geerdet war, ausserhalb des Feldes an den Stahlstab gelegt. Auf die eventuellen Störungen des Verlaufs der Niveauflächen durch einen solchen Halter werde ich an geeigneter Stelle noch zu sprechen kommen.

Sämtliche am Apparat und bei solchen Aufbauen verwendeten Paraffinstücke wurden von Zeit zu Zeit abgeschabt und mit der Flamme eines geerdeten Bunsenbrenners aufgeschmolzen.

Fehlerquellen der Apparatur und der Methode.

Als solche kommen in Betracht:

1. die Fehler des Elektrometers bei der Eichung und Ablesung und die dadurch bedingte Unsicherheit bei der Abtastung,
2. der etwa nicht ganz lineare Spannungsabfall zwischen den Platten P und Q (namentlich in den Randpartien des künstlichen Feldes),
3. die Störungen des Verlaufs der Niveauflächen durch das Kollektorrohr (Sonde S) und eventuell durch den Halter des Modells,
4. die Beeinflussung des Verlaufs der Niveauflächen durch die starre, im zweiten System (Natur) nicht vorhandene obere Platte Q.

Zu 1.:

Fig. 3 zeigt eine verkleinerte Wiedergabe der (im Original fünfmal so grossen) Eichkurve des verwendeten Lutz-Edel-

mannschen Saitenelektrometers. Von dem Okularmaßstab, der in das Mikroskop dieses Elektrometers eingesetzt ist, verwendete ich 50 Skalenteile, von denen jeder dem normalen Auge die Grösse eines Millimeters zu haben schien. Nimmt man nun an, dass man normalerweise etwa auf $^1/_{10}$ mm genau ablesen kann, so ergibt sich aus der vorliegenden Eichkurve, dass man mit diesem Elektrometer Spannungen zwischen 20 und 120 Volt auf halbe Volt, solche von 120—300 Volt auf Volt genau bestimmen kann. Vorausgesetzt ist dabei, dass die Eichkurve richtig ist. Geeicht wurde das Instrument durch Vergleich mit einem Präzisionsvoltmeter der Weston Company. Die Ablesung dieses letzteren erfolgte ebenfalls auf $^1/_{10}$ Skalenteile (ein Skalenteil etwa 2 mm). Da bei Verwendung des hier in Betracht kommenden Messbereiches $^1/_{10}$ Skalenteil gleich $^1/_{10}$ Volt, so erniedrigt sich die (auf das Weston Voltmeter bezogene) Genauigkeit der gemessenen Spannungen im ganzen Messbereich noch um $^1/_2$ Volt, dürfte aber im allgemeinen, wegen der ausgleichenden Wirkung der graphischen Darstellung der Eichung, durch die obigen Zahlen gut gegeben sein.

Die Potentialdifferenz zwischen den beiden 50 cm entfernten Platten P und Q war meist 300 Volt. Der normale Gradient ergibt sich hieraus zu 6 Volt pro Zentimeter oder ca. $^1/_2$ Volt pro Millimeter. Stützt man sich nun auf die Erfahrungen Linkes,[1]) der berichtet, dass bei seinen Untersuchungen die Angaben der Tropfelektroden nie nachweisbar verschieden waren von den Potentialen, die an der Abtropfstelle herrschten, so folgt, dass mit unserer Apparatur der Verlauf der zunächst ungestörten (parallelen) Niveauflächen in der unteren Hälfte des Feldes etwa auf 1 mm, der in der oberen auf etwa 2 mm genau festgestellt werden kann.

---

[1]) F. Linke, Über Messungen von Potentialdifferenzen mittels Kollektoren unter besonderer Berücksichtigung von radioaktiven Substanzen, physikal. Zeitschrift 4, 661, 1903.

Zu 2.:

Ich habe im Verlauf dieser Untersuchung den Spannungsabfall an sehr vielen Stellen der vertikalen Längsmittelebene untersucht. In den mittleren 80 cm, also von Abszisse 60 bis Abszisse 140 cm, ergab sich stets ein Abfall, wie ihn Fig. 4 zeigt. Es sind in dieser die vom Elektrometer angezeigten Spannungen als Abszissen und die dazu gehörigen Höhen der Tropfelektrode über der geerdeten unteren Platte als Ordinaten aufgetragen. Die Spannungen in den Höhen 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 cm gehorchen dem linearen Gesetz sehr gut. Dagegen weichen diejenigen in den Höhen 40 und 45 cm mit einem allerdings kleinen aber unbestreitbaren Betrag von diesem Gesetz ab. Die Spannungen 240 bezw. 270 Volt ergaben sich bei einer Schiebung des Kollektors von unten nach oben stets schon an einem etwa 1 bezw. 2—3 mm unter dem berechneten gelegenen Punkt. Ob diese geringe Verminderung des Gradienten einer durch den sich zerstäubenden Wasserstrahl entstehenden negativen Raumladung in der Nähe der oberen Platte zuzuschreiben ist, oder ob es sich nur um eine Vergrösserung der Leitfähigkeit durch irgend eine Ionisation in der Nähe von Q, oder ob es sich endlich — was ich fast als das Wahrscheinlichste hinstellen möchte — nur um Abweichungen handelt, die durch die Form des Gestelles, auf denen die Platten montiert sind, handelt, lasse ich dahingestellt, da der Unterschied zwischen einer Antwort im einen oder anderen Sinn für die später zu ziehenden Folgerungen keinen Einfluss haben würde. Ich werde darauf später noch zurückkommen.

Was den Spannungsabfall in der Längsmittelebene an Stellen anbetrifft, deren Abszissen kleiner als 60 und grösser als 140 sind, so möchte ich daran erinnern, dass an den Enden des Feldes (Abszissen 0 und 200 cm) der ganze Spannungsabfall in den Paraffinklötzen zusammengedrängt wird. Mit anderen Worten: die Niveaulinien der Vertikallängsmittelebene müssen, gegen die Enden des Feldes zu, nach oben biegen, um dann sämtlich durch die wenige Zenti-

meter starken Isolatoren hindurchzugehen. Die später zu beschreibenden Untersuchungen wurden daher durchweg in dem 80 cm breiten Mittelstück des künstlichen Feldes angestellt.

Zu 3:

Es ist wohl ohne weiteres einzusehen, dass eine Störung der Niveauflächen durch die aufgeladene Sonde nicht eintreten kann, wenn wir etwa, wie oben, den Spannungsabfall zwischen unseren beiden Platten studieren. Denn dann sind ja sowohl Niveauflächen als Sonde den Platten P und Q parallel; der Verlauf der Niveauflächen wird dadurch nicht geändert, dass eine Sonde, die auf ein gewisses Potential aufgeladen ist, ihrer ganzen Länge nach in eine Niveaufläche hineingelegt wird, der dieses selbe Potential zukommt. Ganz anders aber liegt der Fall bei der Untersuchung des Feldes, welches z. B. entsteht, wenn wir eine aus Metall gedrückte Halbkugel so auf die rechteckige Platte P legen, dass der Kugelmittelpunkt mit der Plattenmitte zusammenfällt. Die Niveauflächen sind jetzt natürlich nicht mehr einander parallel; eine auf ein gewisses Potential aufgeladene Sonde, die parallel zu den Platten ist, muss jetzt stören (auch wenn, wie dies hier der Fall ist, ihr Endpunkt mit einem Punkt der Längsmittelebene koincidiert, dem ihr Potential zukommt) und zwar um so mehr, je näher die Sonde an die Kugel herangebracht wird. Es handelt sich nun darum, zu untersuchen, ob sich diese Störung auch in der vertikalen Längsmittelebene bemerkbar macht, und wenn dem so ist, mit welchem Betrag.

Ich habe zu diesem Zweck nach den Formeln der Theorie des Potentiales den Verlauf der für uns in Betracht kommenden Niveauflächen um eine in der angegebenen Weise auf die Platte P gestellten Halbkugel von 10 cm Durchmesser berechnet. Wenn sich durch Vergleich dieses berechneten Verlaufes und des durch die Abtastung gefundenen, namentlich in der Nähe der Halbkugel ergibt, dass beide nur in erlaubten Beträgen voneinander abweichen oder gar identisch sind, so wird die Frage nach einer zu berücksichtigenden Störung durch die Sonde mit Nein zu beantworten sein.

H. Benndorf[1]) hat in seiner Arbeit: „Über die Störung des homogenen elektrischen Feldes durch ein leitendes dreiachsiges Ellipsoid“ in einem vierten Kapitel, betitelt: „Die geladene leitende Kugel im homogenen Felde“, die Formel abgeleitet, die zu der oben erwähnten Berechnung des Verlaufs der Niveauflächen in unserem Falle notwendig ist. Da die im ungestörten Feld durch den Kugelmittelpunkt hindurchgehende Niveaufläche Symmetrie (Spiegel)-Ebene der Äquipotentialflächen ist, so sind die dort für die Kugel abgeleiteten Beziehungen auch ohne weiteres für die Berechnung der Potentiale um unsere Halbkugel brauchbar. Im übrigen sind die darzustellenden Flächen Rotationsflächen, es genügt demnach, den Verlauf der Erzeugenden zu berechnen.

Die betreffende Formel bei Benndorf (Seite 16) lautet:

$$\varphi_a^g = \Phi^u - \mathfrak{Z}^u \, r \cos\vartheta + \mathfrak{Z}^u \frac{c^3}{r^2} \cos\vartheta + \frac{E}{r}.$$

Dabei ist φ_a^g das Potential eines ausserhalb der Halbkugel mit dem Radius c (= 5 cm) liegenden Aufpunktes, dessen Radiusvector (bezogen auf den Kugelmittelpunkt) gleich r und dessen Anomalie (Winkel zwischen diesem Radiusvector und der unteren Platte) gleich $(90 - \vartheta) = \alpha$ ist. Φ^u ist das Potential der Niveaufläche, die im ungestörten Feld durch den Kegelmittelpunkt geht; dieses Potential ist hier ebenso wie die freie Ladung E der Kugel gleich Null. $\mathfrak{Z}^u$ ist der Gradient im ungestörten Feld und in unserem Fall gleich 6 Volt pro Zentimeter.

Berücksichtigt man dies alles, so vereinfacht sich obige Beziehung zu

$$\varphi_a^g = \mathfrak{Z}^u \left(\frac{c^3}{r^2} - r\right) \sin\alpha = 6 \left(\frac{125}{r^2} - r\right) \sin\alpha \text{ Volt}.$$

Da diese Gleichung in $\sin\alpha$ linear ist, so wird man am geschicktesten die Variabeln φ_a^g und r als unabhängige Ver-

[1]) H. Benndorf, Über die Störung des homogenen elektrischen Feldes durch ein leitendes dreiachsiges Ellipsoid, Sitzungsber. der Wiener Akademie mathem. naturw. Klasse, Bd. 115, Abt. IIa, 1906.

änderliche annehmen und zu verschiedenen Wertekombinationen dieser unabhängigen die dann abhängige Variable $\sin \alpha$ berechnen. Lösen wir unsere letzte Gleichung nach $\sin \alpha$ auf, so ergibt sich:

$$\sin \alpha = \frac{\varphi_a^g}{6\left(\frac{125}{r^2} - r\right)}; \quad \left(\frac{125}{r^2} - r\right) = K.$$

Wir berechnen uns zunächst den Wert des Klammerausdrucks K für eine Reihe von Werten r. Er ergibt sich für

r =	8	9	10	12	14	16	18 cm
zu K =	6,05	7,46	8,75	11,13	13,36	15,51	17,61

r =	20	25	30 cm
zu K =	19,69	24,80	29,86.

Wählt man nun, wie auch in der experimentellen Untersuchung, der Reihe nach

φ_a^g =	30	60	90	120	150	180	210	240	270 Volt,

so wird

$\varphi_a^g/6$ =	5	10	15	20	25	30	35	40	45.

Kombinieren wir nun z. B. die erste Zahl 5 dieser zuletzt hingeschriebenen Reihe mit jedem der 10 Werte K, so erhalten wir durch 10 einfache Dreieckskonstruktionen 10 Winkel α, welche die Anomalien der angeschriebenen Radienvectoren r sind. Diese Methode der Konstruktion von α ist für unsere Zwecke genauer und bequemer als die Berechnung der α unter Zuhilfenahme irgend einer trigonometrischen Tafel, denn Endzweck der Berechnung ist ja doch wieder die graphische Darstellung. Die 10 Wertepaare r und α liefern 10 Punkte der Niveaulinie 30 Volt. Auf gleiche Art erhält man Punkte der anderen Niveaulinien.

Wünschen wir auch die Schnittpunkte der in Frage kommenden Niveaulinien mit der Rotationsachse kennen zu lernen, so müssen wir die 10 Bestimmungsgleichungen dritten Grades, die sich aus unserer Formel ergeben, wenn wir $\alpha = 90^0$ und $\varphi_a^g/6$ der Reihe nach gleich 5, 10, 15 u. s. w. setzen, nach r auflösen.

Tut man dies, so ergeben sich für die Niveaulinien

$\varphi_a^g =$	30	60	90	120	150	180	210 Volt
die $r_o =$	7,33	11,03	15,52	20,30	25,20	30,14	35,01 cm

$\varphi_a^g = 240$ 270 Volt

$r_o = 40{,}00$ 45,00 cm.

Ich habe im Diagramm 1 die Resultate dieser Berechnungen zu einer im Maßstab[1]) 1 : 5 ausgeführten graphischen Darstellung der betreffenden Niveaulinien benützt. Diagramm 2 hingegen ist unter Verwendung der durch die Abtastung gewonnenen Daten im selben Maßstab gezeichnet. Wie schon oben erwähnt, kommen zur Entscheidung der in diesem Abschnitt aufgeworfenen Frage lediglich etwa die beiden untersten 30 und 60 Volt entsprechenden Niveaulinien in Frage, denn diese allein weichen nennenswert von den parallelen Niveaulinien des ungestörten Feldes ab.

Wir wollen uns von der Güte der Übereinstimmung dieser beiden Niveaulinien in den Diagrammen 1 und 2 durch einige Zahlen überzeugen.

Das gerechnete Diagramm 1 liefert bei den Abszissen

	100	95	90	80 cm
für Pot. 30 Volt die Ordinaten:	7,3	6,5	5,5	5,1 cm
„ „ 60 „ „ „	11,0	10,8	10,4	10,1 cm

Das auf experimentellem Weg erhaltene Diagramm 2 gibt

bei denselben Abszissen	100	95	90	80 cm
für Pot. 30 Volt die Ordinaten:	7,35	6,5	5,5	5,1 cm
„ „ 60 „ „ „	10,9	10,65	10,26	10,0 cm

Hieraus ergeben sich die Differenzen zwischen den Ordinaten des berechneten und denen des beobachteten Diagramms bei den Abszissen

	100	95	90	80 cm
für Pot. 30 Volt zu	0,05	0,00	0,00	0,00 cm
„ „ 60 „ „	0,10	0,15	0,14	0,10 cm

[1]) Die Diagramme mussten leider der hohen Reproduktionskosten wegen (wo nicht Gegenteiliges bemerkt, im Maßstab 1 : 5) verkleinert werden. Im folgenden angeführte Maße sind naturgemäss den grossen Originaldiagrammen entnommen.

Es dürfte damit wohl in der einwandfreiesten Weise gezeigt sein, dass die Störung, welche das geladene Kollektorrohr in der vertikalen Längsmittelebene hervorbringt, zu klein ist, um merkliche messbare Modifikationen des Verlaufs selbst stark gekrümmter Niveaulinien hervorzurufen.

Wenn dem aber so ist, so kann auch ein senkrecht zu den Feldlängskanten angebrachter Modellhalter (wie er in dem Abschnitt über Isolieren und Laden der Modelle erwähnt ist) das Feld nicht nennenswert stören, womit auch diese Frage entschieden sein dürfte.

Zu 4.:

Nicht ohne Absicht wurde der Radius der Halbkugel, welche in der im vorigen Abschnitt beschriebenen Berechnung und Abtastung verwendet wurde, so klein (= 5 cm) gewählt. Unsere zur Berechnung herangezogene Formel ist nämlich, streng genommen, nur dann richtig, wenn wir es mit einem homogenen Feld von unendlich grosser Ausdehnung zu tun haben. Wir müssen nun aber aus praktischen Gründen bereits der 50 cm vom Kugelmittelpunkt gelegenen Niveaufläche 300 die Gestalt der Ebene aufzwingen. Nun folgt aus unseren obigen Berechnungen der Schnittpunkte der Niveaulinien mit der Symmetrie(Rotations)-Achse, also derjenigen Vertikalen, in der die Störungen gemeiniglich am grössten sein müssen, dass bereits die Niveaulinien 210, 240 und 270 nur mehr um Bruchteile eines Zehntelmillimeter von ihrer Lage im ungestörten Feld abweichen. Da nach einem bekannten Satz der Elektrostatik die Elektrizitätsverteilung in einem Dielektrikum sich nicht ändert, wenn man eine Äquipotentialfläche aus Metall ausführt, so musste praktisch das berechnete Feld mit dem zwischen den Platten entstehenden kongruent sein. Auf diese Weise konnte die Frage nach der Grössenordnung der Störung durch das Kollektorrohr gesondert beantwortet werden.

Da wir auch in der Natur, die ja das zweite — unserem System geometrisch ähnliche — System (der kleinen Halb-

kugel zwischen unseren Platten P und Q würde in der Natur etwa ein ähnlich gestalteter Berg entsprechen) darstellt, keine starre Platte Q haben, sondern ein praktisch unendlich ausgedehntes homogenes Feld (wie wir es in der Rechnung vorausgesetzt haben), so ist es natürlich wichtig, auch den auf den Verlauf der Niveauflächen modifizierend einwirkenden Einfluss der Platte Q zu studieren.

Es stehen uns hiezu zwei Wege zur Verfügung, nämlich

1. wir variieren den Abstand der beiden Platten P und Q unter Beibehaltung der Modellgrösse oder
2. wir wählen grösser und grösser werdende untereinander ähnliche Modelle bei gleichbleibendem Abstand von P und Q.

Ich habe aus technischen Gründen den zweiten Weg gewählt. Um zunächst eine obere Grenze für den zu studierenden Einfluss zu erhalten, habe ich den Verlauf der Niveaulinien (ebenfalls wieder von 30 zu 30 Volt) auch für eine auf der unteren Platte P liegende Halbkugel von **20 cm** Durchmesser berechnet und abgetastet. Eine solche Halbkugel hat über 4 cbdm Volumen; ich habe ein Modell von derartig grossem Volumen und deshalb auch grossem störenden Einfluss später nie wieder benützt, so dass die sich ergebenden Abweichungen zwischen exakter Rechnung und praktischem Experiment mit Recht als obere Grenze angesehen werden können.

Es seien auch hier, bei gleichbleibender Bezeichnung wie früher, die Hauptdaten der Berechnung angegeben. Es ergibt sich für

r =	15	16	17	18	19	20	22 cm
K =	10,56	12,09	13,54	14,91	16,23	17,50	19,93
r =	24	26	28	30	35	37	40 cm
K =	22,26	24,52	26,72	28,89	34,18	36,27	39,38
r =	42	45	47	50 cm			
K =	41,43	44,51	46,55	49,60.			

Ferner berechnen sich durch Auflösen der entsprechenden Gleichungen für die Niveaulinien

$\varphi_a^g =$	30	60	90	120	150	180 Volt
die $r_o =$	11,97	14,75	18,09	22,07	26,43	31,05 cm
$\varphi_a^g =$	210	240	270 Volt			
$r_o =$	35,78	40,60	45,48 cm.			

Diagramm 3 zeigt die in gleichem Maßstab und in derselben Weise wie früher (Diagramm 1) ausgeführte graphische Darstellung dieser Rechenergebnisse. Diagramm 4 ist das Resultat der Abtastung.

Wir wollen uns auch hier durch einige Zahlen über die Abweichungen zwischen Rechnung (Zahlen, die sich auf diese beziehen, sind eingeklammert) und Experiment orientieren.

Pot.	Absz. 100		Absz. 93		Absz. 80	
30 Volt	11,9 cm	(11,97) cm	10,35 cm	(10.30) cm	5,6 cm	(5,60) cm
60	14,5	(14,75)	13.65	(13,60)	10,75	(10,90)
90	17,8	(18.09)	17,3	(17,50)	15,7	(15,82)
120	21,65	(22,07)	21,45	(21,62)	20,55	(20.68)
150	25,9	(26,43)	25,8	(26,00)	25,3	(25,56)
180	30,7	(31,05)	30,65	(30,58)	30,4	(30,38)
210	35,2	(35,78)	35,2	(35,40)	35,0	(35,22)
240	39,9	(40,60)	39,9	(40,22)	39,9	(40,12)
270	44,7	(45,48)	44,7	(45,00)	44,7	(44,98)

Wir erkennen, dass die Abweichungen sehr gering sind in den beiden untersten Niveaulinien. Die durch das Experiment gefundene Niveaulinie 30 Volt ist praktisch sogar identisch mit der berechneten. Die grössten vorkommenden Abweichungen betragen nach der obigen Tabelle 0,8 cm. Diesen Fehler zeigt die Niveaulinie 270 Volt in der Symmetrieachse. Ich habe schon früher darauf hingewiesen, dass ich bei den Untersuchungen über den Spannungsabfall im ungestörten Feld gefunden habe, dass die Niveaulinie 270 auch in diesem stets 2—3 mm zu tief liegt. Dies muss hier in Rechnung gezogen werden. Danach ergibt sich ein Maximalfehler von 0,5—0,6 cm in der genannten Niveaufläche, oder mit anderen Worten: die Niveauflächen werden durch die starre obere Platte im Maximum 0,5 cm nach unten gedrückt.

Dieser Fehler könnte vielleicht dazu beitragen, der hier angewandten Methode mit Misstrauen zu begegnen, eine kleine Überlegung jedoch wird uns einsehen lassen, dass diese Abweichung für die Zwecke, die wir hier im Auge haben, gleichgültig ist.

Ich habe schon oben gestreift, dass unserer Halbkugel in der Natur etwa ein Berg entsprechen könnte von halbkugelförmigem Aufbau. Wir möchten etwa auf dem Berge Potentialgefällemessungen machen und diese dann, um sie mit den Werten irgend einer in der Ebene gelegenen Station vergleichen zu können, auf die Ebene reduzieren. Da wir nun in praxi, selbst wenn wir auf unserem Berg mit dem Fesselballon operieren werden, wohl kaum unsere Kollektoren in Höhen bringen können, die grösser sind als die Erhebung des Berges selbst und da die in diesem Bereich gelegenen, durch Abtastung gefundenen Linien so vorzüglich mit den theoretisch geforderten Werten übereinstimmen, so brauchen wir uns über den Einfluss der oberen Platte auf unsere Endresultate keine Sorge zu machen.

Anschliessend an diese Betrachtung bringe ich ein kleines Beispiel.

1. Beispiel. Auf einem Berg von halbkugelförmiger Gestalt werden auf übliche Weise Potentialgefällemessungen gemacht. Mit welchem Faktor sind dieselben auf die Ebene zu reduzieren?

Antwort: Wir entnehmen dem auf experimentellem Weg gefundenen Diagramm 4 folgendes: Niveaulinie 30 hat von der unteren Platte im ungestörten Feld einen Abstand von 50 mm, auf dem oberen Punkt der Halbkugel beträgt der Abstand zwischen ihr und derselben Niveaulinie 19 mm. Da das Potentialgefälle umgekehrt proportional dem Abstand der Niveauflächen ist, so gilt

$$G : g = 50 : 19,$$

wo G das Gefälle auf dem Berg, g das in der Ebene herrschende gesuchte Gefälle ist.

$$g = G \cdot 19/50 = 0{,}38 \cdot G.$$

Der gesuchte Reduktionsfaktor ist also 0,38.

Ich habe absichtlich bereits ein Beispiel eingefügt, damit man hier, wo die Fehlerquellen behandelt werden, gleich sieht, worauf es später ankommt. Man wird dann auch erkennen, dass es nicht so sehr auf genaue Höhenlage der Niveaulinien ankommt, als darauf, dass sie gerechnet und experimentell bestimmt, dieselbe Form haben, denn wir wollen ja die Diagramme benützen, Gefälle zu reduzieren.

Wir müssen uns also fragen, wie stimmen die in gleichen Höhen über dem Mittelpunkt der Halbkugel nötigen Reduktionsfaktoren überein? Der Reduktionsfaktor ergibt sich in der gleichen Weise wie in unserem Beispiel zwischen den Niveaulinien

0	und	30	zu	0,38	bezw.	(0,39)
30	„	60	„	0,52	„	(0,56)
60	„	90	„	0,67	„	(0,67)
90	„	120	„	0,75	„	(0,79)
120	„	150	„	0,85	„	(0,87)
150	„	180	„	0,96	„	(0,92)
180	„	210	„	0,93	„	(0,94)
210	„	240	„	0,93	„	(0,96)
240	„	270	„	1,00	„	(0,97)

Aus diesen Zahlen sieht man, dass das ganze Diagramm Reduktionsfaktoren von fast gleichbleibender Genauigkeit (Fehler im Mittel 2—3%) zu liefern imstande ist.

Wir fassen demnach zusammen: Die starre obere Platte unseres künstlichen homogenen Feldes modifiziert den Verlauf der beiden unteren Niveauflächen 30 und 60 Volt in nicht nennenswerter Weise; die übrigen Niveauflächen weichen zwar mit (mit der Höhe wachsenden) Beträgen bis zu 0,6 cm vom für das unendliche homogene Feld gerechneten Verlauf ab, haben jedoch innerhalb der üblichen Grenzen die gleiche Form wie die gerechneten, so dass die Berechnung von Reduktionsfaktoren auch zwischen höher liegenden Äquipotentialflächen des Feldes vorgenommen werden dürfte, wenn dies praktischen Wert hätte.

Untersuchungen.

Wenn wir die Messanordnungen, die bei luftelektrischen Forschungen verwendet werden, überblicken, so erkennen wir sofort zwei grosse Gruppen:

In der ersten befinden sich solche, die zu Potentialmessungen verwendet werden.

In der zweiten diejenigen, die zur Ermittlung der Zerstreuung, der Ionenzahl, Ionengeschwindigkeit und damit der elektrischen Leitfähigkeit der Luft dienen.

Demgemäss gliedern sich auch die vorliegenden Untersuchungen in solche, die sich auf die unter 1. charakterisierten Anordnungen und in andere, die sich auf Apparate beziehen, mit Hilfe deren man die unter 2. genannten Grössen misst.

Ein dritter Abschnitt der Arbeit soll noch Einiges über die Konfiguration der Niveauflächen um Luftfahrzeuge herum bringen.

I.

Untersuchungen, die sich auf Messanordnungen zur Ermittlung des Potentialgefälles beziehen.

Will man vergleichbare, absolute Gefällewerte des elektrischen Erdfeldes beobachten, so ist vor allen Dingen notwendig im ungestörten Feld zu arbeiten. Es dürfen also die an und für sich parallelen Niveauflächen des in den unteren Schichten nahezu homogenen Erdfeldes nicht durch lokale Einflüsse, also etwa Häuser, Türme, Wälder, Hügel, Stangen u. s. w. deformiert sein.

Es soll hier an erster Stelle ausführlicher der störende Einfluss von Bodenerhebungen verschiedener Form behandelt werden.

Die hiezu nötigen Modelle verfertigte ich mir aus Weissblech. Es waren dies zunächst drei kleine Kreiskegel von je 10 cm Höhe und Öffnungswinkeln von 30, 60 und 90 Grad.

Die Diagramme 5, 6, 7

zeigen den experimentell ermittelten Verlauf der Niveaulinien 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240 und 270 Volt in der Längsmittelebene für den Fall, dass die Achse des auf der Platte P stehenden Kegels durch den Mittelpunkt dieser Platte ging.

Vergleichen wir diese drei Diagramme, so bemerken wir ohne weiteres, dass

1. der Abstand zwischen Kegelspitze und Niveaufläche 30 Volt um so kleiner ist, je kleiner der Öffnungswinkel ist. Auf einem spitzen Berg wird also das normale Gefälle mehr gestört sein als auf einem stumpferen von gleicher Höhe;
2. die Störung der Niveauflächen durch einen Kegel sich in einer um so grösseren Umgebung bemerkbar macht, je grösser der Öffnungswinkel ist.

Wir wollen uns von den Störungen in verschiedenen Entfernungen von der Kegelachse quantitativ überzeugen durch Berechnung der mittleren Gefällereduktionsfaktoren. (Der mittlere Gefällereduktionsfaktor zwischen zwei Niveaulinien ist gleich dem Abstand dieser Flächen im gestörten Feld dividiert durch den Abstand derselben Flächen im ungestörten Feld.)

Wir finden aus:	Diagramm 5	Diagramm 6	Diagramm 7
	die Reduktionsfaktoren:		
1. auf der Kegelspitze . .	0,06	0,08	0,14
2. in Entf. = 1 Höhe . .	1,08	1,16	1,33
3. in Entf. = 2 Höhe . .	1,00	1,04	1,06
4. in Entf. = 3 Höhe . . .	1,00	1,00	1,02

Diese Zahlen lassen nochmals das, was oben qualitativ ausgedrückt wurde, quantitativ ersehen:

1. Gefällsmessungen auf einem Berg, der die Gestalt eines Kegels von 30 ° (60 °, 90 °) Öffnungswinkel hat, müssen vor ihrem Vergleich mit solchen in der Ebene, durch Multiplikation mit 0,06 (0,08, 0,14) reduziert werden.
2. Stellt man die Gefällemessungen in einer Entfernung gleich der zwei- (drei-, vier-)fachen Höhe des Berges an, so ist eine Reduktion nicht mehr vonnöten.

Mit diesen Zahlen ist jedoch die quantitative Ausbeute unserer drei Diagramme bei weitem nicht erschöpft.

Da, wie schon oben erwähnt wurde, die Elektrizitätsverteilung in einem Dielektrikum sich nicht ändert, wenn man sich eine der Niveauflächen durch einen starren Leiter ersetzt denkt, so können wir auch jede unserer Niveauflächen als Erdoberfläche ansprechen. Es wird in der Natur schon so wie so nicht allzu häufig vorkommen, dass man Berge von rein kegelförmiger Gestalt hat. Formen dagegen, wie sie die Niveaulinien der Diagramme 5—7 liefern, treten öfters auf.

Es ist natürlich auch nicht annähernd möglich, die Fülle von Einzelfällen, die unsere drei Diagramme, auf diese Weise betrachtet, liefern, hier alle anzuführen. Ich begnüge mich mit einem Beispiel, welches zeigen soll, wie ich mir die Verwendung dieser Diagramme in der Praxis denke.

2. Beispiel: Ein Luftelektriker ist gezwungen, seinen Beobachtungsort zur Bestimmung des Potentialgefälles auf einer isolierten Anhöhe zu wählen. Er zeichnet sich zunächst mit Hilfe einer Höhenkarte den Achsenquerschnitt der Anhöhe und vergleicht diesen dann mit den Niveaulinien der Diagramme 5, 6, 7 und eventuell 2, 4. Er möge finden, dass die Niveaulinie 30 Volt des Diagrammes 7 dem Querschnitt seines Berges am meisten ähnlich ist. Diese Niveaulinie hat an ihrem höchsten Punkt von der Niveaulinie 60 Volt einen Abstand von 25,5 mm, im ungestörten Feld jedoch einen solchen von 51 mm. Der besagte Luftelektriker hat also seine Gefällewerte mit

$$25{,}5 : 51{,}5 = 0{,}5$$

zu multiplizieren, um sie mit denen, die zur selben Zeit an einem Ort in der Ebene vorgenommen worden sind, vergleichen zu können.

Neben symmetrisch (in Bezug auf ihre Achse) aufgebauten Bergen kommen in der Natur häufig solche vor, deren Horizontalschnitt in der Nähe des Fusses ungefähr ein Rechteck ist und deren Scheitel einen Grat oder (natürlich näherungs-

weise) eine Plattform rechteckiger Gestalt bilden. Um auch über die Störungen der Äquipotentialflächen durch derartige Bodenerhebungen etwas zu erfahren, habe ich aus Weissblech auch zwei Körper dieser Gestalt zu formen versucht.

Die Diagramme 8 und 9

zeigen diese Körper und die über sie hinweg ziehenden Niveaulinien in je zwei aufeinander senkrechten (verschieden schraffierten) Schnitten.[1]) Die linken Hälften dieser Blätter werden durch den Querschnitt, die rechten durch einen Längsschnitt ausgefüllt. Bricht man also die zwei Diagramme längs der Vertikalen mit der Abszisse 100 und stellt die beiden Hälften rechtwinkelig zueinander, so kommt man zu einer räumlichen Vorstellung der Niveauflächen. Ich habe absichtlich den Querschnitt des Grates I (II) so bemessen, dass er dem Achsenquerschnitt des in Diagramm 5 (7) dargestellten Kegels kongruent ist. Man sieht so in höchst instruktiver Weise, wie der Verlauf der Niveaulinien im (Haupt-)Querschnitt eines Grates sich von demjenigen im Achsenquerschnitt eines Kegels vom gleichen Öffnungswinkel und gleicher Höhe unterscheidet. Die in besagten Schnitten von beiden Körpern hervorgerufenen Störungen machen sich beim Grat viel weiter in die Ebene hinein bemerkbar als beim Kegel. Jedoch rückt die unterste Niveaufläche 30 Volt nicht so nahe an den Grat wie an den Kegel.

Ich bringe nun unter Beschränkung auf den Hauptquerschnitt des Grades I bezw. II einige Reduktionsfaktoren und werde, um das eben Gesagte noch präziser zum Ausdruck zu bringen, die bei den betreffenden Kegeln an entsprechenden Stellen gefundenen Faktoren in Klammern dazusetzen.

Wir finden aus:

	Diagramm 8 (5)	Diagramm 9 (7)
	die Reduktionsfaktoren:	
1. auf der Gratspitze . . .	0,22 (0,06)	0,32 (0,14)
2. in Entf. = 1 Höhe . . .	1,27 (1,08)	1,56 (1,33)
3. in Entf. = 2 Höhe . . .	1,08 (1,00)	1,14 (1,06)
4. in Entf. = 3 Höhe . . .	1,02 (1,00)	1,04 (1,02)

[1]) Perspektivische Ansicht siehe Figur 6.

Im übrigen ist natürlich klar, dass ebenso wie bei den Kegeln auch hier jede einzelne der Niveauflächen als Erdoberfläche angesehen werden kann.

Es kommt bei Gefällemessungen oft vor, dass man gezwungen ist, die Messungen in der Nähe eines Hauses zu machen. Da sich ein solches mit flachem Dach am besten mit einem Würfel vergleichen lässt, so habe ich auch diesen in den Bereich meiner Untersuchungen gezogen.

Diagramm 10

gibt den Verlauf der üblichen Niveauflächen über einem Würfel von 10 cm Kantenlänge. Der Würfel war bei der Abtastung im Felde so orientiert, dass vier seiner Kanten den Feldlängskanten parallel waren und die Projektion seines Mittelpunktes auf die Platte P mit der Mitte derselben zusammenfiel.

Die Störungen durch einen solchen Würfel sind, wie man auf den ersten Blick wahrnimmt, recht beträchtliche, sie sind etwa so gross als diejenigen, die der Kegel mit dem Öffnungswinkel 90° und derselben Höhe (10 cm) hervorzurufen imstande war.

Rechnen wir die Entfernungen von der Mitte des Würfels aus, so können wir den Gefällereduktionsfaktor angeben:

1. für Messungen auf dem Würfel (Haus) zu 0,51;
2. für Messungen in einer Entfernung, die gleich der ein- (zwei-, drei-) fachen Höhe des Würfels (Hauses) ist, zu 1,26 (1,08, 1,02).

3. Beispiel: Auf einem Berge, dessen Hauptschnitte jenen der Niveaufläche 60 Volt in Diagramm 8 am meisten ähnlich sind, steht ein Observatorium von etwa 7 m Höhe und ungefähr würfelförmiger Gestalt. 14 m von der Mitte des Hauses entfernt werden Potentialgefällemessungen gemacht. Wie gross ist der Faktor, mit dem man die Beobachtungsresultate auf die Ebene zu reduzieren hat?

Antwort: Die Berechnung zerfällt in zwei Teile:

1. Wäre das Haus auf dem Gipfel nicht vorhanden, so würde der Reduktionsfaktor dort gleich

$$36 : 50 = 0{,}72$$

sein.

2. Stände das Haus in der Ebene (als solche kann die Bergkuppe dem kleinen Haus gegenüber betrachtet werden), so würde der Reduktionsfaktor in einer Entfernung gleich der doppelten Höhe gleich 1,08 sein.

Der Gesamtreduktionsfaktor ergibt sich als Produkt der beiden Teilfaktoren zu

$$R = 0{,}72 \cdot 1{,}08 = 0{,}78.$$

Ich brauche wohl nicht noch besonders ausführen, dass die Niveaulinien des Diagramms 10 auch das Material liefern, die Störungen der Niveaulinien über Bergen, die einen ihnen ähnlichen Querschnitt haben, zu studieren.

Wenn nun auch durch diese Untersuchungen über den störenden Einfluss von Bodenerhebungen eine gewisse Summe von schätzenswertem Material allgemeiner Natur gewonnen wurde, so kann natürlich trotzdem nicht angenommen werden, dass es in allen Fällen ausreicht. Aber es hindert ja nichts, statt der oben verwendeten Körper einfachster geometrischer Gestalt direkt ein Modell der in Betracht kommenden Gegend zu verwenden. Es würde dann nicht nötig sein, sich über mehr als zwei oder drei Niveaulinien zu orientieren, um über die Grösse der nötigen Reduktionsfaktoren sofort eingehenden Aufschluss zu erhalten. Ich will nur streifen, dass ich im Lauf dieser Untersuchungen auf Anregung von Herrn Dr. Dieckmann, dem Leiter der luftelektrischen und radiotelegraphischen Station in Gräfelfing bei München, einmal eine derartige Untersuchung des ganzen Gräfelfinger Versuchsfeldes, welches durch zwei 40 m hohe Antennen, verschiedene Häuser, ein Wäldchen und diverse Telegraphenstangen gestört ist, mit glücklichem Erfolg vornahm. Man fertigt für solche Untersuchungen das Modell am besten aus Gips an, dem

man behufs besserer Modellierbarkeit etwas Leim zugibt. Das ganze Modell wird nach dem Trocknen gehörig mit Graphit — der eine gute Oberflächenleitung garantiert — eingerieben und hierauf zum Schutz gegen das Wasser des Kollektors mit einem Ölfarbenanstrich versehen. Orientiert man dann das Modell, das passend in einem solchen Maßstab ausgeführt wird, dass seine tiefsten Punkte in der Platte P, seine höchsten 10 cm über derselben liegen, in dem künstlichen Felde so, dass die Stellen, über denen man Reduktionsfaktoren kennen zu lernen wünscht, in der Vertikallängsmittelebene liegen, so ist alles zur Abtastung, die genau in derselben Weise wie oben beschrieben wurde, vorgenommen werden kann, bereit.

Solche Untersuchungen haben dann natürlich nur ein ganz lokales Interesse und müssen für jeden Einzelfall besonders durchgeführt werden. Aus diesem Grunde habe ich auch die Kurven, die für den Gräfelfinger Versuchsplatz erhalten wurden, hier nicht mit aufgenommen.

Ich möchte diesen Abschnitt meiner Arbeit nicht schliessen, ohne eine originelle theoretische Untersuchung über denselben Gegenstand erwähnt zu haben. Der schon oben genannte Luftelektriker H. Benndorf[1], veröffentlichte bereits im Jahre 1900 eine Abhandlung mit dem Titel: „Über die Störungen des normalen atmosphärischen Potentialgefälles durch Bodenerhebungen.“ Er gab in derselben mit Hilfe einer von Maxwell u. a. bei der Theorie des Probescheibchens verwendeten Methode für einige typische Fälle von Bodenerhebungen (Hochplateau, einseitig ausgedehnter Hügel, kreisförmiges Plateau, Hügelrücken u. s. w.) die Zahlen zur Berechnung der nötigen Reduktionsfaktoren. Da die Rechnung bis zu einem beliebigen Grad von Genauigkeit getrieben werden kann, so war es Benndorf möglich, den störenden Einfluss der Bodenerhebungen noch viel weiter in die Ebene hinein zu verfolgen, als dies mittels unserer Diagramme ge-

[1]) H. Benndorf. l. c.

schehen konnte. Er hat bei seinen Untersuchungen wohl auch mehr die Frage zu lösen versucht, wie weit man sich von der störenden Bodenerhebung entfernen muss, um wieder ein praktisch störungsfreies Feld zu haben; die vorliegenden Beobachtungen dagegen geben die Reduktionsfaktoren in der Nähe des störenden Körpers. Es bilden deshalb die von Benndorf erhaltenen Resultate eine wertvolle Ergänzung unserer auf experimentellem Weg gefundenen Zahlen.

Unter den zu Beginn dieses ersten Kapitels aufgezählten, bei Feldstörungen besonders häufig in Betracht kommenden Körpern, befinden sich auch die Stangen. Da der störende Einfluss dieser Gebilde ebenfalls von Benndorf[1]) in einer dritten Arbeit, betitelt: „Über gewisse Störungen des Erdfeldes mit Rücksicht auf die Praxis luftelektrischer Messungen", bereits theoretisch unter der Voraussetzung, dass man eine Stange näherungsweise durch ein Rotationsellipsoid ersetzen darf, eingehend behandelt war, so war es mir ein Bedürfnis festzustellen, ob man durch eine experimentelle Untersuchung des Feldes um derartige Gebilde zu den gleichen Resultaten kommt. Musste doch eine Übereinstimmung der beiderseitigen Ergebnisse das Vertrauen zu der von mir verwendeten Methode und Apparatur in hohem Masse festigen.

Das die Stange verkörpernde Modell war ein 20 cm langes Messingstäbchen von 4 mm Durchmesser. Ich lötete es in vertikaler Lage in der Längsmittelebene des Feldes auf die Platte P.

Diagramm 11

zeigt die Konfiguration der Niveaulinien in einem durch die Achse der Stange gehenden ebenen Schnitt.

Wir berechnen uns wieder eine Reihe von Reduktionsfaktoren, um sofort einen zahlenmässigen Einblick in die hervorgerufenen Störungen zu erhalten. Es sei h die Höhe der Stange, dann ergeben sich zwischen Niveaulinie 0 und 30 Volt:

---

[1]) H. Benndorf, l. c.

in den Entfernungen . . .	0,2 h	0,5 h	1,0 h	1,5 h
die Reduktionsfaktoren . .	1,94	1,16	1,06	1,02

Benndorf schreibt (l. c. p. 21): Bei absoluten Messungen des atmosphärischen Potentialgefälles in der Ebene wird es unter Umständen von Wert sein zu wissen, dass die Störung im Umkreis eines stangenartigen Gebildes (Telegraphenstange, Pappel, Kirchturm) ca. 5 % resp. 1 % beträgt, wenn man sich in einer Entfernung befindet, die gleich der einfachen resp. doppelten Stangenhöhe ist.

Diese Angaben stehen mit denen von uns aus Diagramm 11 gewonnenen in ausserordentlich gutem Einklange.

Es ist jedoch bei der Anwendung obiger Zahlen Vorsicht angebracht. Sie gelten nämlich nur für Höhen bis zu etwa einem Drittel der Höhe der störenden Stange, für die von Benndorf angeführten stangenartigen Gebilde also sehr wohl, nicht aber z. B. für den Fall, dass die Stange, auf der unser Kollektor sitzt, halb so gross oder eben so gross ist wie die störende Stange. In solchen Fällen gibt uns Diagramm 11 andere Reduktionsfaktoren.

4. Beispiel: Auf einer Wiese steht in die Erde gerammt ein 4 m hoher Pfahl. Aus irgendwelchem Grunde ist man gezwungen in einer Entfernung gleich seiner Höhe Potentialgefällemessungen auszuführen, bei denen der Kollektor 2 m über dem Boden angebracht wird. Mit welchem Faktor hat man die Messungen zu reduzieren?

Antwort: Der Abstand der Niveaulinie 60 Volt von der Platte P ist im ungestörten Feld 100 mm, im gestörten 105 mm. Der Reduktionsfaktor ist also

$$R = 105 : 100 = 1{,}05.$$

Nach Benndorfs Tabelle VIII berechnet sich dieser Reduktionsfaktor zu 1,04.

Es soll noch in anderer Weise die Übereinstimmung Benndorfscher Resultate mit den aus Diagramm 11 abzulesenden Zahlen vorgeführt werden. Dazu ist jedoch nötig sich mit dem Benndorfschen Störungskoeffizienten μ vertraut zu machen.

Seite 9 der zitierten Arbeit finden wir die Definition

$$\mu_\varphi = \frac{\varphi_a^g - \varphi_a^u}{\varphi_a^u}$$

wo μ_φ der besagte Störungskoeffizient, φ_a^g das Potential im gestörten Feld an einem ausserhalb des störenden Körpers gelegenen Aufpunkte und φ_a^u das Potential im selben Aufpunkt ist, wenn dieser Körper weggenommen wird. Benndorf berechnete durch Identifizierung der Stange mit einem halben Rotationsellipsoid (es gelten hier ähnliche Betrachtungen wie bei der Halbkugel) den Störungsfaktor μ an verschiedenen Punkten des Feldes und tabellierte ihn dann. So gibt Tabelle VIII die Werte für μ zu einem Ellipsoid vom Achsenverhältnis a/c = 0,01. Dieses Achsenverhältnis stimmt genau mit dem Verhältnis von Länge und Radius unseres Stangenmodells überein.

Jene Tabelle VIII liefert z. B. für eine Horizontalentfernung von der Stangenachse $\rho = 0{,}4$ h und in einer Höhe z über dem Boden =

0,0 h	0,2 h	0,4 h	0,6 h	0,8 h	1,0 h
1,1 h	1,2 h	1,4 h	1,6 h	die Störungsfaktoren	
—0,172	—0,167	—0,157	—0,137	—0,112	—0,079
—0,064	—0,052	—0,034	—0,022		

Ich habe diese Abhängigkeit zwischen μ und z durch eine Kurve graphisch dargestellt und dieser dann entnommen für Höhen z =

0,300 h	0,595 h	0,865 h	1,083 h	1,305 h	1,535 h
die Störungsfaktoren μ =					
—0,162	—0,137	—0,115	—0,066	—0,042	—0,025

Die Zahlen der vorletzten Reihe sind aber nichts anderes als die — in Stangenhöhen ausgedrückten — Ordinaten der Schnittpunkte der Niveaulinien 30, 60, 90, 120, 150, 180 Volt mit einer von der Stange um 0,4 h entfernten Parallelen. Da die Definitionsgleichung für μ_φ eine Auflösung nach φ_a^g gestattet und wir das Potential φ_a^u im ungestörten Feld an jenen Schnittpunkten durch Multiplikation der in Zentimetern aus-

gedrückten Höhen z mit dem Gradienten 6 Volt/cm leicht angeben können, so gelingt es φ_a^g an jedem dieser Punkte zu berechnen. Die Übereinstimmung dieser Werte mit den beobachteten Werten 30, 60, 90, 120, 150, 180 Volt wird dann wieder ein Maßstab für die Beurteilung der Güte der von uns verwendeten Methode sein.

Es ist

$$\varphi_a^g = \mu_\varphi \varphi_a^u + \varphi_a^u = \varphi_a^u (1 + \mu_\varphi)$$

Nach dieser Formel berechnet sich für $\rho = 0{,}4\,h$ und

$z = 0{,}300\,h$	$0{,}595\,h$	$0{,}865\,h$	$1{,}083\,h$	$1{,}305\,h$	$1{,}535\,h$
$\varphi_a^g = 30{,}2$	$61{,}6$	$91{,}9$	$121{,}4$	$150{,}0$	$179{,}5$ Volt.

Bedenken wir, dass es bei dieser Art der Prüfung auf absolute Lage der Niveauflächen ankam, dass ferner wir einen Zylinder, Benndorf aber ein halbes Rotationsellipsoid als Störungsobjekt hatte — wodurch die Fehler in der Nähe der Spitze, also etwa bei 0,865 h und 1,083 h erklärt werden könnten — so müssen wir eingestehen, dass die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment zum mindesten eine gute ist.

—

Teils um die etwa noch vorhandenen Bedenken über die starre obere Platte Q gänzlich zu zerstreuen, teils um das Prinzip der elektrischen Ähnlichkeit einmal recht anschaulich vor Augen zu führen, habe ich die

drei Diagramme 12 bis 14

angefertigt. Sie zeigen den Verlauf der Niveaulinien in Feldern, die durch Stangen von 10, 20 und 30 cm Höhe gestört sind. Nach dem Prinzip der elektrischen Ähnlichkeit müssen nun — wenn die Platte Q keinen Einfluss auf die Konfiguration der Niveauflächen ausübt — die Niveauflächen 30 (60 90) Volt des Diagramms 12 den Niveaulinien 60 (90, 180) Volt des Diagramms 13 und den Niveaulinien 90 (180, 270) Volt des Diagramms 14 ähnlich seien. Schneiden wir diese Niveaulinien durch Parallele zu den Stangenachsen, so zwar, dass die Abstände dieser Parallelen von den Stangenachsen gleich

einem gewissen Teilbetrag der Stangenhöhen sind, so müssen sich die Ordinaten der Schnittpunkte in entsprechenden Parallelen wie die Stangenhöhen, also wie 1 : 2 : 3 verhalten. So ergeben sich z. B. für einen Abstand der besagten Parallelen gleich 0,4 mal der Stangenhöhe die Ordinatenverhältnisse

$$61 : 119 : 174 = 1{,}025 : 2 : 2{,}93$$
$$111 : 218 : 319 = 1{,}02 : 2 : 2{,}93$$
$$156 : 306 : 452 = 1{,}02 : 2 : 2{,}96.$$

Diese Zahlen dürften vollends den Beweis führen, dass selbst bei störenden Körpern grösserer Höhe die starre Platte Q keinen allzu grossen Einfluss auf den Verlauf der Niveauflächen ausübt, wenn nur die störenden Körper kein allzu grosses Volumen haben. Ausserdem muss noch bemerkt werden, dass die drei verwendeten Stangenmodelle gleichen Durchmesser hatten, so dass also die grösste Stange einen zu kleinen, die kleinste einen zu grossen Durchmesser hatte. Man hat wohl noch einen guten Teil der Abweichungen vom reinen Verhältnis 1 : 2 : 3 diesem Grund zuzuschreiben.

Ich will an das Diagramm 13 noch eine andere Überlegung anschliessen, die zeigen soll, wie vielseitig diese Kurven verwendet werden können. Denkt man sich nämlich in dieses Diagramm die Kraftlinien, das sind die Orthogonaltrajektorien der Niveaulinien eingezeichnet, so gibt es unter diesen eine, welche den Fuss der Stange gerade noch trifft. Dreht man das Diagramm um die Stangenachse, so beschreibt diese „Grenzkraftlinie“ eine Fläche, die einem Paraboloid nicht unähnlich ist. Alle Kraftlinien, die innerhalb dieser Fläche verlaufen, enden auf der Stange. Alle die positive Elektrizität, die der vertikale Leitungsstrom längs dieser, in jene Fläche eingeschlossenen, Kraftröhren nach unten schafft, fliesst durch die Stange zur Erde ab. Unterbrechen wir die aus Metall gefertigte Stange in der Nähe des Bodens durch einen Isolator und überbrücken dann diese Stelle wieder mit einem Galvanometer, so wird jene Elektrizität durch das Galvanometer zur Erde fliessen und in demselben, falls dasselbe nur

genügend empfindlich ist, einen dauernden Ausschlag hervorrufen. Die Kenntnis des Verlaufs jener Grenzkraftlinie erlaubt uns nun aus dem Ausschlag des geeichten Galvanometers und der Stangenhöhe den vertikalen Leitungsstrom pro Quadratzentimeter zu berechnen. Wäre nämlich die Stange nicht vorhanden gewesen, so hätten die Mündungen der auf der Stange endigenden Kraftröhren ein Stück Erdoberfläche ausgefüllt, das der im Diagramm 13 gezeichneten Grenzkraftlinie zufolge gleich dem Flächeninhalt eines Kreises ist, dessen Radius gleich 0,55 der Stangenhöhe beträgt. Ist I die durch das Galvanometer gemessene Stromstärke, h die Höhe der Stange, so berechnet sich demnach der Leitungsstrom pro Quadratzentimeter zu

$$i = I / (0{,}55 \cdot 0{,}55 \cdot h \cdot h \cdot 3{,}14).$$

5. Beispiel. Ein 10 m hoher und 14 cm dicker durch Umwickeln mit Draht leitend gemachter Mast ist durch einen Bodenisolator von der Erde isoliert. Zwischen Mast und Erde ist ein Galvanometer eingeschaltet. Welche Stromstärke zeigt das Galvanometer, wenn der normale Leitungsstrom gleich $2 \cdot 10^{-16}$ Ampère pro Quadratzentimeter beträgt?

Die Auflösung der Gleichung des Textes nach I ergibt:

$$I = 0{,}55 \cdot 0{,}55 \cdot 1000 \cdot 1000 \cdot 3{,}14 \cdot 2 \cdot 10^{-16}$$
$$= 1{,}9 \cdot 10^{-10} \text{ Ampère,}$$

das ist eine Grösse, die mit einem guten Galvanometer bei Fernrohrablesung noch leicht gemessen werden kann.

Studium von leitenden Stangen mit aufgesetzten Kollektoren im künstlichen homogenen Feld.

Noch vor kurzer Zeit war es allgemein üblich, Gefällemessungen auf folgende (Exnersche) Art und Weise auszuführen. Ein 1—2 m langer Hartgummistab, der an seinem unteren Ende mit einer etwa 10 cm langen eisernen Spitze armiert war, wurde durch Eindrücken dieser Spitze in den Erdboden senkrecht zu den Niveauflächen des Erdfeldes orientiert. Auf den Stab wurde eine Flammen-, Polonium-, Zink-

oder Tropf-Elektrode gesteckt und diese durch einen dünnen Draht mit dem möglichst weit entfernt aufgestellten Elektrometer, das auf einem kleinen Stativ angebracht war, verbunden.

An dieser Anordnung sind im Laufe der Zeit verschiedene Nachteile zutage getreten, die alle ihren Ursprung in dem ungünstigen Verhalten der langen Hartgummistangen hatten.

1 Die Schwierigkeiten, die mit der Herstellung und Montierung von Hartgummistangen von über 2 m Höhe verbunden sind, gestatten es praktisch nicht, Potentialgefällemessungen mit Stangen, die grösser sind als 2 m, durchzuführen.

2. Der Hartgummi hält den Witterungseinflüssen äusserst schlecht stand, namentlich krümmt er sich unter den Einwirkungen der Sonnenstrahlen. Er muss deshalb während der Messungen öfters gedreht werden. Bei dem hiedurch bedingten öfteren Anfassen des Stabes war man nie sicher, ob nicht Elektrisierung durch Reibung auftrat, die die Genauigkeit der Messungen stark beeinträchtigen konnte. Dieser Nachteil des Ebonits macht sich besonders dann bemerkbar, wenn mit Zinkelektroden gearbeitet wird, da diese bekanntermassen nur dann gut arbeiten, wenn sie von der Sonne direkt bestrahlt werden.

3. Schien die Sonne nicht, so lag die Gefahr nahe, dass entweder vom Wind aufgewirbelter Staub den Hartgummi elektrisierte, wie etwa der aus dem Freiballon ausgeworfene, an der Gondel dahingleitende Ballastsand den Ballon elektrisiert oder dass sich bei hohem Feuchtigkeitsgehalt der Luft der Hartgummi mangels jedweder Trockenvorrichtung ganz oder teilweise mit Wasserdampf beschlug, wodurch man zu vollständig unkontrollierbaren Zuständen kam.

Auf der luftelektrischen Station Gräfelfing wird zum erstenmal in grösserem Maßstab der Versuch gemacht, die Gefällemessungen nicht mit der üblichen oben beschriebenen Anordnung, Ebonitstab-Kollektor, auszuführen, sondern lei-

tende aber vom Boden isolierte Stangen,[1]) die an ihrer Spitze den Kollektor tragen, zu verwenden.

Diese Stangen bestehen aus Bambusrohr (bis 11 m Höhe), welches durch Umwickeln mit Draht leitend gemacht ist. Der Widerstand, den eine solche Bambusstange Wind, Wetter und Feuchtigkeit entgegensetzt, ist der denkbar grösste. Die Isolation von Erde geschieht mittels kräftiger, in Gusseisen eingeschmolzener Hartgummi-Bodenisolatoren, die während der Dauer der Messung durch energische Trockenmittel (Calciumcarbid) vor Beschlag geschützt werden.

Der Grund, warum man sich nicht schon früher zu einer derartigen Anordnung bequemt hatte, war der Mangel einer genauen Kenntnis des resultierenden Niveauflächenverlaufs.

Man fürchtete, dass die lange, leitende, noch dazu senkrecht zu den Niveauflächen orientierte, mit dem Kollektor gekrönte Stange eine derartige Störung in das Feld bringen würde, dass es nicht mehr angängig sei, das Gefälle einfach als Quotient von abgelesener Spannung und Abstand des Kollektorausgleichspunktes vom Boden zu berechnen.

Die folgenden Untersuchungen werden jedoch die Gegenstandslosigkeit der vorhandenen Befürchtungen genugsam dartun.

Ich liess es mir bei dieser Gelegenheit nicht entgehen, unsere verschiedenen Ausgleichshilfsmittel: Flamme, radioaktive Substanz und zerstäubender Wasserstrahl einer vergleichenden Untersuchung unter neuen Gesichtspunkten zu unterziehen.

Derartige Vergleiche sind ja schon des öfteren durchgeführt worden, so von Pellat,[2]) Henning,[3]) Linke,[4])

---

[1]) M. Dieckmann, Luftelektrische Messanordnungen, Phys. Zeitschrift 10, 22, 832, 1909.

[2]) H. Pellat, Untersuchung über die Aufladegeschwindigkeit von Kollektoren bei Änderung des Potentials, Comptes Rendus 100, 735, 1886.

[3]) F. Henning, Vergleichende Messungen des elektrischen Potentials mittels der Flamme und eines aus radioaktiven Substanzen bestehenden Kollektors, Annalen der Physik, 4. Folge, 7, 893, 1902.

[4]) Linke, l. c.

Ebert,[1]) Lutz,[2]) Conrad,[3]) aber die meisten derselben bezogen sich auf die Ökonomie der Kollektoren und nur C. W. Lutz hat für den speziellen Fall des von ihm angegebenen Flammenkollektors den Verlauf der Niveauflächen im künstlichen Feld bestimmt.

1.

Um das Modell einer mit Flamme versehenen Stange zu erhalten, verschloss ich die eine (untere) Öffnung eines 200 mm langen Messingröhrchens von 5 mm äusserem Durchmesser mit etwas Lot und verengerte die andere (obere) durch Auszüge auf etwa 1 mm. Das ganze Röhrchen füllte ich mit absolutem Alkohol, der einen mit etwas Blei beschwerten Docht netzte.

Die Isolation gegen das Blech P wurde durch einen kleinen Hartgummiständer, dessen Oberfläche mit Paraffin überzogen war, erreicht. Beim Entzünden des Alkohols entstand eine Flamme, die eine Höhe von etwa 2 mm hatte und mit einer Füllung etwa 30 Minuten brannte.

Beim Abtasten des Feldes stiess ich zunächst auf ein kleines Hindernis. Der elektrische Zustand, namentlich oberhalb der Flamme, war nämlich nicht konstant; die Niveauflächen wogten vielmehr in gewissen Grenzen auf und nieder. Ich suchte deshalb bei konstanter Abszisse nicht mehr bestimmte Potentiale auf, sondern beobachtete in jeder Vertikalen das Potential in bestimmten Höhen (3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 und 45 cm), zog jedesmal aus drei Beobachtungen das Mittel und fand endlich die Ordinaten der gesuchten Potentiale (hier 20, 40, 60 u. s. w. Volt) durch graphische Interpolation.

---

[1]) H. Ebert, Über elektrische Messungen im Luftballon, Beiträge zur Geophysik, VI, Heft 1, 1903.

[2]) Lutz, l. c.

[3]) V. Conrad, Über die entladende Wirkung verschiedener Elektroden, Sitzungsberichte der Wiener Akademie, 111. IIa, 333, 1902.

Das Ergebnis dieser etwas langwierigen Untersuchung zeigt

Diagramm 15.

Zu demselben ist folgendes zu bemerken:

1. Die durch die Flammengase erhöhte Leitfähigkeit der Luft um die Flamme bedingt ein geringeres Gefälle, also ein Auseinandergehen der Niveauflächen (siehe die Kuppe oberhalb der Flamme).
2. Die Stange nimmt ein höheres Potential an, als dem Ort ihrer Spitze zukommt.

Die Ursache der letztgenannten Tatsache ist jedoch nicht der leitenden Stange zuzuschreiben, sie ist auch, wie längst bekannt, bei isoliert aufgestellten Kollektoren zu konstatieren.

Die variable Lage der Niveauflächen infolge der Anwesenheit der Flammengase wurde, wenigstens in ihren Folgen, bereits von Linke[1]) erkannt, der das Ergebnis seiner Erfahrungen in folgende Worte fasst: „Bei Potentialmessungen auf freiem Feld kann man stets die Beobachtung machen, dass jede Änderung des Windes auch Änderungen der Angaben des Kollektors zur Folge hat, die sich nicht gut durch gleichzeitige Variationen des Gefälles erklären lassen."

2.

Als radioaktiven Kollektor verwendete ich einen Polonium-(Radium-F)-Kollektor üblicher Grösse (Platinblechscheibe von 3 cm Durchmesser, elektrolytisch polonisiert), der auf das als Stangenmodell dienende Röhrchen einfach aufgesteckt wurde. Die Isolation dieses letzteren gegen Platte P geschah wieder durch einen paraffinierten Hartgummisockel.

Die beim Flammenkollektor bereits bemerkte Veränderlichkeit der Niveauflächen zeigte sich hier noch weit ausgeprägter. Die im

Diagramm 16

eingezeichneten Punkte mussten deshalb auf eben dieselbe Art wie dort bestimmt werden. Ich möchte auf die Form der

[1]) Linke, l. c.

Niveaulinien, die das Diagramm zeigt, nicht allzuviel Gewicht gelegt wissen. Das erhaltene Bild lehrt eben nur, wie unzuverlässig die Angaben eines solchen Kollektors sind, wenn Windstille herrscht.

Dieses Ergebnis wurde bereits auf einem anderen Weg von Linke[1]) erhalten, der es folgendermassen formuliert: „Die Verhältnisse werden verwickelt und ungünstig bei Flammen und radioaktiven Substanzen. Während bei Tropfkollektoren die weggeschafften Elektrizitätsmengen an den Tropfen haften und mit ihnen herabfallen, ohne dass sie noch berücksichtigt werden müssen, ist bei der zweitgenannten Art genau zu beachten, wo die weggeschaffte Elektrizität bleibt. Verschwindet sie auf dem langwierigen Weg der Diffusion, so bilden sich räumliche Ladungen, die sogar das durch eine geladene Platte hergestellte Feld um mehr als 10 Volt verändern."

Ein Blick auf

Diagramm 17,

welches bei einer Windgeschwindigkeit von etwa 1,5 m pro Sekunde gewonnen wurde, zeigt uns die vorteilhafte Wirkung der bewegten Luft auf den Ausgleich durch einen Radiokollektor. Die unsicheren, stark ausgebauchten Niveaulinien oberhalb des Kollektors sind flachen bestimmten Linien gewichen. Eine Veränderlichkeit der Konfiguration der Niveaulinien war nicht mehr zu konstatieren, was ein bequemes und sicheres Ausmessen des Feldes gestattete; die oben beschriebene Interpolationsmethode brauchte also hier nicht angewendet werden.

Es sei noch erwähnt, dass die gebrauchte Luftströmung (Wind) durch einen elektrisch betriebenen, etwa 30 cm im Durchmesser haltenden Ventilator, der ca. 1 m Horizontalabstand vom Kollektor hatte, erzeugt wurde. Die Windgeschwindigkeit berechnete ich aus dem senkrecht zur Windrichtung auftretenden Winddruck, wobei angenommen wurde,

[1]) Linke. l. c.

dass für die gleiche (senkrecht zur Windrichtung orientierte) Fläche der Winddruck proportional dem Quadrat der Windgeschwindigkeit und für eine Fläche von 1 qdcm und eine Windgeschwindigkeit von 1 m/sec der Winddruck 1 gr beträgt. Den Winddruck ermittelte ich aus der Ablenkung, die ein etwa 15 gr schweres, quadratförmiges Pappdeckelstück von 1 dcm Seitenlänge durch den Wind erfuhr, wenn ich es senkrecht zur Windrichtung, an zweien seiner Ecken mit Fäden aufgehängt, in die Luftströmung brachte. Da durch eine auf den Ventilator aufgesteckte Blechmanschette eine nahezu horizontale Windrichtung garantiert wurde, ferner der Ablenkungswinkel nur wenige Grad betrug, so konnte die in die Windrichtung fallende Schwerekomponente des Pappstückes gleich dem Winddruck gesetzt werden. Aus dieser Beziehung berechnet sich dann unschwer der Winddruck.

Ich glaube, dass die Diagramme 15—17 einen ganz neuartigen Einblick in die Wirkungsweise des Flammen- bezw. Radiokollektors gewähren. Hat man sich früher hauptsächlich damit beschäftigt, zu untersuchen, was auf dem Leiter, den der Kollektor krönt, vorgeht, d. h. welches Potential er schliesslich annimmt und in welcher Zeit er dies tut, so fördern diese Diagramme die Kenntnis der Zustände, die nach der Aufladung im Dielektrikum herrschen. Wir sehen bei einer derartigen Untersuchung in gewissem Sinn im Elektroskop das um die Kollektoren dieses Typs wogende ionisierte Gas, wir sehen die über die geerdete Stange sich drängenden Niveauflächen eine nach der andern durch die Spitze hindurchgleiten bis sich endlich ein gewisser Ruhezustand einstellt. Aber auch dann steht das Elektroskop nicht ganz still; Zufälligkeiten, ein Hauch mit dem Munde, nicht stärker als der, mit dem man eine Kerze ausbläst, genügt, um das in der Nähe der Elektrode ionisierte Gas mit nichtionisiertem zu vermischen; ein neues Gleichgewicht stellt sich ein, um in der nächsten Sekunde abermals von einem andern abgelöst zu werden. Ganz anders jedoch, wenn der Ventilator einen

frischen Luftzug erzeugt; da strebt das Elektroskop langsam aber sicher einem ganz bestimmten Endpotential zu, all die überschüssige ionisierte Luft nimmt der Wind mit sich; das hat zwar den Nachteil, dass sie anfangs, wo sie gebraucht werden könnte zum Ausgleich, bis zu einem gewissen Grad fehlt, die Ladezeit also etwas verlängert wird, dafür aber werden auch dem, der Potentialgefällemessungen macht, keine Gefälleänderungen vorgetäuscht, die gar nicht auf Rechnung des Erdfeldes kommen.

Die blosse Abtastung des Feldes um eine Stange mit radioaktivem Kollektor hat den Nachteil, dass sie nicht gestattet, das Potential, das die Stange selbst hat, genügend genau zu bestimmen. Man könnte zwar aus Diagramm 17 dieses Potential mit einer gewissen Genauigkeit interpolieren, aber eine direkte Bestimmung mittels des Elektroskops würde natürlich den Vorzug verdienen. Ich habe, um diese Bestimmung ausführen zu können, ohne gleichzeitig den Verlauf der Niveauflächen irgendwie stören zu müssen, die Platte P in der Mitte durchbohrt und das entstandene Loch durch einen Hartgummistopfen mit feiner achsialer Bohrung B ausgefüllt (siehe Fig. 5). Auf das oben etwas hervorragende Ende dieses Stopfens konnte, diesen umfassend, ein Hartgummizapfen von etwas grösserem Durchmesser gesteckt werden, der seinerseits wieder eine achsiale Bohrung besass, die dem Durchmesser der kollektortragenden Stange gleich war. Zog man nun von der Stange aus durch B unterhalb der Platte P zu einem 1 m vom Feld entfernten Elektroskop einen feinen Draht, so war eine Leitung geschaffen, die gestattete, das Potential, auf das sich der Kollektor auflud, genauestens zu messen, ohne das Feld zwischen den Platten zu stören.

Wir können mit der nun vervollständigten Apparatur folgende Fragen entscheiden:

1. Welche Potentiale P nehmen Stangen verschiedener Höhe h, die durch einen Poloniumkollektor ausgeglichen werden, an und wie gross ist der Unterschied P — p

zwischen diesen Potentialen und jenen Potentialen p, die sich am Ort des Kollektors durch Abtastung mit dem Wasserkollektor im ungestörten Feld ergeben haben?

2. Ändern sich die unter 1 angeführten Grössen, wenn wir
   a) Poloniumkollektoren,
   b) Stangen

von verschiedenem Durchmesser verwenden?

Zunächst muss bemerkt werden, dass auch bei diesen Beobachtungen ein starkes Schwanken der vom Elektroskop angezeigten Spannungen zu konstatieren war, wenn ohne Ventilator gearbeitet wurde, die folgenden Zahlen sind deshalb alle bei Anwesenheit von Wind gewonnen. Dabei wurde Sorge getragen, dass der Wind stets zentral auf den Kollektor blies, d. h. bei höheren Stangen wurde auch der Ort des Ventilators erhöht.

1. In einem Feld, dessen Gradient G = 4 Volt/cm betrug, erhielt ich mit einem Poloniumkollektor I von 3 cm Durchmesser (gebräuchliche Grösse) folgende Zahlen:

h = 10	15	20	25	30 cm
P = 42	64	86,5	108	128 Volt
p = 40	60	80	100	120 „
P — p = 2	4	6,5	8	8 „

Bei G = 2 Volt/cm

h = 10	15	20	25	30 cm
P = 20	31,3	42,0	52,8	63,5 Volt
p = 20	30	40	50	60 „
P — p = 0	1,3	2,0	2,8	3,5 „

2. Nachstehende Werte erhielt ich für einen Kollektor II von 12 mm Durchmesser.

G = 4 Volt/cm

h = 10	15	20	25	30 cm
P = 42,5	64	86	107,5	128 Volt
p = 40	60	80	100	120 „
P — p = 2,5	4	6	7,5	8 „

G = 2 Volt/cm

h = 10	15	20	25	30 cm
P = 20,5	31,3	42	52	62,8 Volt
p = 20	30	40	50	60 „
P — p = 0,5	1,3	2,0	2,0	2,8 „

Ein Kollektor III von 9 mm Durchmesser endlich liefert folgendes:

G = 4 Volt/cm

h = 10	15	20	25	30 cm
P = 42	64	85,5	107	128 Volt
p = 40	60	80	100	120 „
P — p = 2	4	5,5	7	8 „

G = 2 Volt/cm

h = 10	15	20	25	30 cm
P = 20,5	31	41,3	52	63 Volt
p = 20	30	40	50	60 „
P — p = 0,5	1,0	1,3	2,0	2,3 „

Aus diesen Tabellen ergibt sich:

1. Der Poloniumkollektor lädt sich stets auf ein Potential P auf, das höher ist als das Potential p, welches an seinem Ort im ungestörten Feld herrscht. P — p ist also stets positiv. P — p wächst ferner in dem beobachteten Bereich linear (nicht proportional) mit der Höhe des Kollektors über dem Boden.
2. Die Dimensionen eines Poloniumkollektors sind im beobachteten Bereich ohne wesentlichen Einfluss auf seine Angaben.

Ich muss ausserdem noch hinzufügen, dass ich identische Werte erhielt, wenn ich statt der 3 mm im Durchmesser haltenden Stangen solche von 2 oder 4 mm verwendete.

Die Angaben eines Poloniumkollektors sind also innerhalb gewisser Grenzen auch praktisch unabhängig von dem Durchmesser der ihn tragenden Stange.

Es steht nun noch die Frage offen, ob P — p eine Funktion der Stangenhöhe oder, was doch auch möglich ist, eine Funktion

des Potentials ist, auf das sich der Kollektor schliesslich auflädt. Diese Frage muss sich beantworten lassen, wenn man P bei ein und derselben Stangenhöhe, aber verschiedenen Feldgradienten beobachtet. Die in dieser Hinsicht angestellten Versuche lieferten folgende Resultate:

Gradient . . .	G = 3	4,5	6 Volt/cm
Stangenhöhe . .	h = 20	20	20 cm
Kollektor I . .	P = 63,5	96,0	128,5 Volt
Kollektor II .	P = 63,5	96,0	128,5 „
Kollektor III .	P = 63,5	96,0	128,5 „
	p = 60	90	120 „
	P — p = 3,5	6,0	8,5 „
oder in Prozent von	P = 5,5	6,25	6,6 „

Es dürfte hiermit in einwandfreier Weise nachgewiesen sein, dass (P — p) in dem beobachteten Bereich eine lineare Funktion von P (also des Aufladepotentiales) ist; die Höhe der leitenden Stange, auf der der Kollektor sitzt, hat mit (P — p) nichts zu tun, denn die Resultate der letzten Tabelle, die mit denen der vorhergehenden Tabellen gut übereinstimmen, wurden ja alle bei derselben Stangenhöhe erhalten. Die Exnersche Anordnung (Ebonitstab-Kollektor) muss also dasselbe Potentialgefälle liefern als die neue, welche leitende Stangen mit Bodenisolatoren verwendet. Ich verdanke einer Privatmitteilung des Herrn Prof. Daunderer in Bad Aibling, dass sich dies bei vergleichenden Messungen in der Natur bestätigte. Unsere Tabellen gestatten aber auch den durch P — p bedingten Fehler bei Gefällemessungen mit radioaktiven Kollektoren zu berechnen.

6. Beispiel. Zur Reduktion einer in der Nähe eines Hauses angebrachten registrierenden Potentialgefällemessanordnung sollen auf freiem Feld Absolutmessungen gemacht werden. Die hiezu verwendete Anordnung besteht aus einer leitenden Stange nebst Poloniumkollektor gebräuchlicher Grösse und einem mit diesem durch einen dünnen Draht verbundenen Elektroskop. Die Stange steckt in einem Bodenisolator und

hat eine derartige Höhe, dass der Kollektor genau 1 m vom Boden absteht. Bei mässigem Wind liest der Beobachter 94 Volt ab; wie gross ist das zur Reduktion zu benützende Gefälle?

Antwort: Aus den Zahlen der letzten Zeile der obigen Tabelle ergibt sich durch eine einfache Interpolation, dass im Falle unseres Beispiels $P - p = 6{,}3\,\%$ von P (in unserem Fall 94 Volt) also

$$P - p = 94 \cdot 0{,}063 = 5{,}9 \text{ Volt.}$$

Da P gleich 94 Volt, so ergibt sich das Potential des Kollektorortes im ungestörten Feld zu

$$p = 94 - 5{,}9 = 88{,}1 \text{ Volt.}$$

Das zur Reduktion zu benützende Gefälle ist also 88,1 Volt/m.

Wir wollen uns nun einmal überlegen, ob es möglich ist, dass Potentialgefällemessungen, die zur Berechnung der positiven Raumladung mit radioaktiven Kollektoren vorgenommen worden sind, imstande sind, eine grössere Raumladung vorzutäuschen, als wirklich vorhanden ist, wenn man die von uns in diesem Abschnitt untersuchte Verlagerung des Ausgleichspunktes nicht beachtet (wenn man also $P = p$ setzt). Wir nehmen an, die Beobachtungen werden mit drei Kollektoren vorgenommen, der erste soll in unmittelbarer Nähe des Erdbodens, der zweite 1 m, der dritte 2 m über diesem sich befinden. Machen wir ferner einmal die hypothetische Annahme, dass keine Raumladung vorhanden sei und dass das Gefälle 60 Volt/m betrage. Wir werden dann, nach unserer letzten Tabelle zu schliessen, zwischen dem I. und II. Kollektor eine Spannungsdifferenz von 63,5 Volt, zwischen dem II. und III. Kollektor eine solche von $128{,}5 - 63{,}5 = 65{,}5$ Volt erhalten. Wir müssten also folgern, dass das Gefälle im unteren Meter geringer ist als im oberen. Da wir nun aber in der Natur stets finden, dass das Gefälle im oberen Meter geringer ist als im unteren, so folgt daraus, dass unter den oben präzisierten Umständen nicht eine zu

grosse, sondern eine zu geringe positive Raumdichte sich aus unseren Beobachtungen ergeben würde.

3.

Nach den schon oben zitierten Beobachtungen Linkes schien es nicht notwendig, auch den Wasserkollektor einer eingehenderen Untersuchung im elektrischen Feld zu unterziehen. Was mich dennoch dazu bewogen hat, ist folgendes:

1. Linke hat auch beim Wasserkollektor nur Ladezeit und Ladeendpotential untersucht, es war also nicht ohne Interesse, auch hier etwas über die Zustände im Dielektrikum zu erfahren, namentlich durften die Stellen in der nächsten Nähe des in Tropfen aufgelösten Wasserstrahls als interessant gelten.

2. Es fehlt an Kenntnissen über die Verlagerung des Ausgleichspunktes bei einem praktischen Wasserkollektor gefälliger Form. Eine solche Verlagerung muss nämlich vorhanden sein — auch dann, wenn Linkes Urteil über die Tropfelektrode richtig ist —, denn durch das verhältnismässig grosse Kollektorgefäss werden ja die Niveaulinien in der Nähe des Kollektors wahrscheinlich nicht unerheblich deformiert.

A. Ich tastete das Feld um eine Stange ab, die an ihrem oberen Ende durch einen kleinen Wasserkollektor ausgeglichen war. Dieser Modellkollektor war die im Maßstab 1 : 2 ausgeführte getreue Nachbildung eines für Beobachtungen im Freien gebräuchlichen Kollektors. Er arbeitete mit einer Füllung etwa 20 Minuten lang, Zeit genug, um bei flinkem Arbeiten gerade eine Vertikale des Feldes auszumessen. Die Dimensionen von Stange und Kollektor ergeben sich aus

Diagramm 18,

welches das graphische Ergebnis der Abtastung vermittelt. Der zerstäubende Wasserstrahl deformiert nicht im geringsten die Niveauflächen, die er schneidet. In die Augen fallend ist auch der Umstand, dass bei einem derartig gebauten Wasserkollektor das Potential P, auf das sich der Kollektor

auflädt, kleiner ist als das Potential p, das dem Auflösungspunkt im ungestörten Feld zukommt.

Es ist also hier, bei gleichbleibender Bezeichnung wie früher, P — p negativ.

B. Um auch beim Wasserkollektor genaue Angaben über P — p geben zu können, habe ich auch bei diesem, analog wie beim radioaktiven Kollektor, direkte Messungen von P vorgenommen. Im folgenden soll unter h stets die Höhe des Auflösungspunktes über der geerdeten unteren Platte verstanden werden.

Gefälle G = 4 Volt/cm

h = 14,5	19,5	24,5	29,5 cm
P = 51,0	71,5	81,0	112,0 Volt
p = 58,0	78,0	98,0	118,0 „
p — P = 7,0	6,5	7,0	6,0 „

G = 6 Volt/cm

h = 14,5	19,5	24,5	29,5 cm
P = 75,5	107,0	137,0	168,0 Volt
p = 87,0	117,0	147,0	177,0 „
p — P = 11,5	10,0	10,0	11,0 „

G = 8 Volt/cm

h = 14,5	19,5	24,5	29,5 cm
P = 103,0	141,0	183,5	222,0 Volt
p = 116,0	156,0	196,0	236,0 „
p — P = 13,0	15,0	12,5	14,0 „

G = 10 Volt/cm

h = 14,5	19,5	24,5	29,5 cm
P = 127,5	176,0	228,0	276,5 Volt
p = 145,0	195,0	245,0	295,0 „
p — P = 17,5	19,0	17,0	18,5 „

Aus diesen Zahlen ergibt sich zunächst, dass P — p beim Wasserkollektor weder eine Funktion von P noch eine Funktion der Stangenhöhe ist, sondern lediglich vom Gradienten

des ungestörten Feldes abhängt. Wir erhalten aus obigen Tabellen für ein Gefälle von

	$G = 4$	6	8	10 Volt/cm
im Mittel	$p - P = 6{,}8$	10,6	13,6	18 Volt
	$(p - P)/G = 1{,}7$	1,8	1,7	1,8 cm

Aus dieser Zusammenstellung ersieht man, dass $p - P$ eine lineare Funktion von G und dass die Niveaufläche, deren Potential P der Modellkollektor schliesslich annimmt, im ungestörten Feld im Mittel $\Delta = 1{,}75$ cm unter dem Ort des Auflösungspunktes des Wasserstrahls liegt. Sind die Abmessungen des Kollektors doppelt so gross, haben wir also einen Kollektor, wie man ihn in der Praxis wirklich gebraucht, so beträgt dem Prinzip der elektrischen Ähnlichkeit zufolge der im letzten Satz definierte Höhenunterschied

$$\Delta = 2 \cdot 1{,}75 = 3{,}5 \text{ cm},$$

unabhängig von der Grösse des Gradienten G.

7. Beispiel: Auf freiem Felde werden mit einer Anordnung wie im vorhergehenden Beispiel, nur mit dem Unterschied, dass statt des Poloniumkollektors ein Wasserkollektor verwendet wird, dessen Dimensionen aus Diagramm 18 im Maßstab 1 : 10 ersichtlich sind, Potentialgefällemessungen gemacht. Die Ausflussöffnung liegt genau 1 m über dem Boden, das Elektroskop zeigt 121 Volt. Wie gross ist im ungestörten Feld das Gefälle?

Antwort: Da der benützte Wasserkollektor nach den beschriebenen Untersuchungen das Potential einer Niveaufläche annimmt, die 3,5 cm unter seiner Ausflussöffnung liegt, so entspricht den 121 Volt nur ein Höhenunterschied von $100 - 3{,}5 = 96{,}5$ cm. Der Gradient ergibt sich danach zu 121 Volt dividiert durch 0,965 m = 125,4 Volt/m.

Da ich weder ein Schwanken der Angaben des Wasserkollektors noch eine Beeinflussung derselben durch Wind konstatieren konnte, so kann ich nicht umhin, den Wasserkollektor als den für alle Absolutmessungen am geeignetsten hinzustellen. Es wird zwar niemand, der Potentialgefälle-

messungen im Gelände gemacht hat, den namentlich durch die Konstruktion des Herrn Dr. Lutz so überaus brauchbar und handlich gemachten Flammenkollektor oder auch den Poloniumkollektor gegen den mit Wasser gefüllten und deshalb schweren Wasserkollektor eintauschen mögen, aber zu Reduktionsmessungen sollte man sich die Beschwerlichkeiten, die mit dem Wasserkollektor verbunden sind, nicht reuen lassen. Namentlich sollten auch Präzisionsgefällemessungen, wie sie zur Bestimmung der positiven freien Raumladung erforderlich sind, stets mit Tropfkollektoren vorgenommen werden; insbesondere dann, wenn man mit geringen Stangenhöhen arbeitet, da sonst die Versuchsfehler einen allzugrossen Einfluss auf das Resultat haben.

II.

Untersuchungen, die sich auf Apparate beziehen, welche zum Messen der luftelektrischen Zerstreuung und der Leitfähigkeit benützt werden.

Der Apparat, der zur Erlangung der ersten Kenntnisse über die Elektrizitätsleitung in der Atmosphäre die wertvollsten Pionierdienste geleistet hat, ist der Elster und Geitelsche[1]) Zerstreuungsapparat. Seiner Einfachheit, seiner Handlichkeit, seinem verhältnismässig kleinen Volumen, das ihn zum Reiseinstrument tauglich macht, verdanken wir das zum Teil schon recht erhebliche Beobachtungsmaterial aus fast allen Kontinenten unseres Planeten. Sein Wert für die Entwicklung der Luftelektrizität ist unbestreitbar und, an seinen gebührenden Platz gestellt, wird er sich wohl noch lange als wesentlicher Bestandteil der luftelektrischen Apparatur behaupten. Nur darf man nicht glauben, dass er ein Instrument zur quantitativen Bestimmung der Leitfähigkeit ist. Dieser Satz bringt nichts Neues und ist schon von den meisten Luftelektrikern ausgesprochen worden. Ich erinnere

[1]) J. Elster und H. Geitel, Über die Elektrizitätszerstreuung in der Luft, Annalen der Physik, II, 425, 1900.

nur an Harald Schering,[1]) der ja die nach ihm benannte Versuchsanordnung eigens zu dem Zweck konstruiert hat, um dem Mangel abzuhelfen. Die folgenden Untersuchungen sollen die Einwände, die gegen den Elster- und Geitelschen Apparat in dieser Hinsicht gemacht worden sind, stützen und ihnen zum Teil eine reellere Grundlage geben.

Der Zerstreuungsapparat von Elster und Geitel besteht bekanntlich aus einem nach eben den beiden Forschern genannten Aluminiumblattelektroskop und einem zylindrischen Zerstreuungskörper, der auf den Blättchenträger aufgesteckt wird. Der Zerstreuungskörper wird geladen, die Ionen des entgegengesetzten Vorzeichens werden angezogen, neutralisieren sich an ihm und die pro Zeiteinheit neutralisierte Elektrizitätsmenge, ausgedrückt in Bruchteilen der Gesamtladung des Zerstreuungskörpers (das ist der sogen. Zerstreuungskoeffizient), wäre der Leitfähigkeit der Atmosphäre proportional, wenn eben gegen den Apparat die Einwände nicht erhoben werden könnten, die im folgenden vorgebracht werden sollen.

Ich habe zunächst in einem

Diagramm 19

die Ergebnisse der Untersuchung für den Fall wiedergegeben, dass sich der Apparat geladen an einem vor dem Erdfeld vollständig geschützten Ort (Zimmer, Laube u. s. w.) befindet. Die Ladespannung betrug bei den sämtlichen hier beschriebenen Anordnungen 200 Volt, eine Spannung, die auch sonst für diesen Apparat üblich ist. Das Aufladen geschah mittels einer Akkumulatorenbatterie und zwar jedesmal kurz vor der definitiven Bestimmung der Koordinaten eines Beobachtungspunktes. Auf diese Art war eine eventuell störende Leitung zum Zerstreuungskörper nicht nötig. Es ist ferner zu bemerken, dass zwar alle Punkte, die man zum Zeichnen der Niveauflächen von 20 zu 20 Volt braucht, beobachtet wurden,

[1]) H. Schering, Der Elster-Geitelsche Zerstreuungsapparat und ein Versuch quantitativer Zerstreuungsmessungen, Annalen der Physik, 4. Folge, Bd. 20, 174, 1906.

aber behufs einer besseren Übersichtlichkeit nicht alle zur Darstellung kamen. Der Maßstab der Bilder ist auch hier 1 : 5.

Man erkennt an dem Diagramm zunächst die ausserordentlich starke Verdichtung der Niveaulinien in der Nähe des Elektroskops. Dort, wo der Stiel des Zerstreuungskörpers in den Hals des Elektroskops eintritt, herrscht ein Gefälle von über 100 Volt pro Millimeter. Die Niveaulinien treten hier sämtlich in das Gehäuse ein, um durch den Isolator im Fusse desselben hindurchzugehen. Es ist wohl ohne weiteres nach diesem Bild zu erwarten, dass in jenem Teil des Apparates, der zwischen dem unteren Teil des Zerstreuungskörpers und dem Elektroskop liegt, Sättigungsstrom herrscht. Es wird also die Stromstärke, d. i. die pro Zeiteinheit neutralisierte Elektrizitätsmenge, der vorhandenen Spannung nicht proportional sein, oder mit anderen Worten: die graphisch dargestellte Abhängigkeit zwischen Stromstärke und Spannung, die Stromcharakteristik, wird keine durch den Ursprung des Koordinatensystems gehende Gerade sein. Gilt aber das Coulombsche Zerstreuungsgesetz nicht, haben wir keinen freien Strom, so besteht auch die einfache Abhängigkeit (Proportionalität) zwischen Zerstreuungskoeffizient und Leitfähigkeit nicht. Die Praktiker der luftelektrischen Forschung haben hierauf schon des öfteren hingewiesen und ihre Beobachtungen haben die aufgestellten Behauptungen durchaus gerechtfertigt.

Ist der Elster- und Geitelsche Apparat schon bei einer derartigen geschützten Aufstellung mit gewissen Mängeln behaftet, so würde er ohne Schutzdach gänzlich unbrauchbar werden, wenn wir ihn ins homogene Erdfeld bringen.

Diagramm 20

zeigt die Konfiguration der Niveaulinien, wenn sich der wieder positiv auf 200 Volt geladene Apparat im künstlichen homogenen Feld befindet. An die obere Platte des künstlichen Feldes war dabei ein Potential von 60 Volt angelegt, was also einem Gefälle von 120 Volt pro Meter entspricht. Die Superposition

der beiden Felder ergibt eine Auflockerung der Niveaulinien. Das Gefälle ist kleiner wie im vorhergehenden Diagramm. Der Zerstreuungskoeffizient wird also bei einer derartigen Aufstellung und Ladung weniger gross sein als am geschützten Ort.

Ganz anders wird das Bild, wenn wir den Zerstreuungskörper negativ geladen in dasselbe homogene Feld bringen.

Im

Diagramm 21,

welches die Ergebnisse für diesen Fall darstellt, kommt durch die Übereinanderlagerung der beiden Felder eine Äquipotentiallinie Null zustande, die sich über den Apparat hinwegzieht und ein Zusammendrängen der Niveaulinien unter ihr bedingt. Das Gefälle ist grösser wie im vorletzten Diagramm und noch grösser als im letzten. Der Zerstreuungskoeffizient wird deshalb bei einer negativen Ladung des Apparates einen erheblich grösseren Wert annehmen als bei einer positiven.

Dadurch wird eine Polarität der beiden Ionenarten, die man an freien ungeschützten oder nicht vollständig geschützten Orten fast immer erhält, vorgetäuscht. An solchen Standorten muss sich also der Quotient q aus dem negativen und positiven Zerstreuungskoeffizienten grösser als 1 ergeben.

Es sei mir erlaubt, an dieser Stelle einige Werte von q einzufügen, die E. v. Schweidler[1]) auf dem Naturforscherkongress in Salzburg, wo er über den Einfluss des Standortes auf die Angaben eines Elster- und Geitelschen Zerstreuungsapparates berichtete, bekannt gab. Er fand aus je mehreren Hundert Messungen, gewonnen aus Beobachtungen, die sich über eine Anzahl von Sommern erstreckten, die folgenden Mittelwerte:

---

[1]) E. v. Schweidler, Über den Einfluss des Standortes auf Messungen der Zerstreuung und Leitfähigkeit der Atmosphäre. physik. Zeitschrift. 10, 22, 847, 1909.

a) Geschützter Standort:

Mattsee	1902;	$q = 0{,}98$
Mattsee	1903;	$q = 1{,}00$
Mattsee	1905;	$q = 0{,}99$
Ossiach	1906;	$q = 0{,}97$

b) Nicht vollkommen geschützter Standort:

Seewalchen	1904;	$q = 1{,}18$
St. Gilchen	1907;	$q = 1{,}22$
Seeham (A)	1908;	$q = 1{,}38$
Seeham (B)	1908;	$q = 1{,}09$

Dabei ist zu bemerken, dass die geschützten Standorte des Apparates gedeckte Gartenhäuschen bezw. Veranden zu ebener Erde sind; als nicht vollkommen geschützte Orte gelten teilweise überdachte Balkone und Veranden im I. oder II. Stock.

Für Seeham 1908 ist Ort A der balkonartig vorspringende Teil einer Veranda, Ort B ein etwa 1,5 m weiter innen liegender, bereits überdachter Punkt.

Die aus den Beobachtungen gewonnenen Zahlen sind demnach vollkommen in Übereinstimmung mit den oben aufgestellten Sätzen.

Es wäre falsch, wenn man behaupten wollte, dass Elster und Geitel diesen Fehler ihres Apparates, nämlich die Beeinflussung seiner Angaben durch das Erdfeld, nicht sofort erkannt haben. Schon in ihren ersten Veröffentlichungen wiesen sie darauf hin und gaben auch sofort als elektrostatischen Schutz einen nach unten offenen Topf (Schutzzylinder) an, der geerdet den Zerstreuungskörper umgeben sollte. Sie empfahlen und verwendeten diesen Tof hauptsächlich für Beobachtungen auf Bergspitzen oder an sonstigen exponierten Stellen mit hohem Potentialgefälle.

Ein solcher Blechschutzzylinder hat nun aber den Nachteil, dass er erstens die Kapazität des Systems nicht unerheblich vergrössert und zweitens die Ionen nur auf dem langwierigen Weg der Diffusion zum Zerstreuungskörper

kommen lässt. Dazu gesellt sich noch ein weiterer Nachteil, der weiter unten besprochen werden soll. Der an zweiter Stelle genannte Mangel wurde späterhin einigermassen dadurch behoben, dass an Stelle des Blechtopfes ein Schutzzylinder aus Drahtnetz von etwa 1 cm Maschenweite trat. Dieser Einführung verdanke ich es, dass es mir ermöglicht wurde, das Feld um den Zerstreuungskörper auch bei Anwesenheit des Schutzzylinders abzutasten. Ich konnte auf diese Weise die Sonde durch die Maschen des Netzes in das Innere des Topfes einführen. Freilich musste auch hier wieder jene graphische Interpolationsmethode verwendet werden, die schon beim Flammenkollektor beschrieben wurde, denn ein Aufsuchen bestimmter Potentiale war wegen der beschränkten Bewegungsfreiheit innerhalb einer Masche nicht möglich.

Diagramm 22

zeigt zunächst das Untersuchungsergebnis für den Fall, dass sich der Apparat mit Schutzzylinder an einem schon geschützten Ort (Zimmer) befindet. Wenn man dieses Diagramm mit dem ersten dieser Serie vergleicht, erkennt man, um wie viel grösser hier das Gefälle ist. Der auf diese Weise noch mehr in den Vordergrund gerückte Sättigungsstrom wird die Stromcharakteristik in noch viel höherem Grade modifizieren als dies die ungünstige Form des Apparates tut. Verwendet man überdies noch den undurchlässigen Blechtopf, so kann man eigentlich keinen anderen Unterschied zwischen dem Zerstreuungsapparat und einem Ebertschen Ionenzähler angeben als den, dass man bei ersterem die Fördermenge nicht kennt. Eine Proportionalität zwischen Leitfähigkeit und Zerstreuungskoeffizient ist dann so gut wie ausgeschlossen.

Diagramm 23 und 24

geben die Niveauflächen bei Anwesenheit eines homogenen Feldes von der schon früher angegebenen Intensität bei positiv bezw. negativ geladenem Zerstreuungskörper. Ein in die Augen springender Unterschied zwischen beiden Feldern lässt sich nicht konstatieren, was beweist, wie vorteilhaft der Topf

wäre, wenn das Gefälle durch ihn nicht so in die Höhe getrieben würde.

Nun gibt uns ja aber Diagramm 19 die Mittel an die Hand, die Dimensionen eines Schutzzylinders zu bestimmen, der das Feld des Zerstreuungskörpers schützt, ohne dass man eine allzustarke Gefällerhöhung zu befürchten hätte. Ich halte einen Zylinder von 20 cm Radius und 30 cm Höhe aus einem Drahtnetz von 2—3 cm Maschenweite für angemessen. Durch einen solchen kann zwar die Erhöhung des Gefälles nicht vollständig hintangehalten werden, aber die Modifikation beträgt kaum mehr als 10%.

Ich kann nicht unterlassen darauf hinzuweisen, dass diejenigen der vorliegenden Diagramme, die den Zerstreuungsapparat im homogenen Feld zeigen, durch die Starrheit der Niveaufläche 60 Volt, d. i. die Platte Q etwas modifiziert werden. Ein prinzipiell anderer Verlauf dürfte jedoch so gut wie ausgeschlossen sein.

Es folgen nun zwei Untersuchungen, die zwar nicht ganz streng dem gestellten Thema unterzuordnen sind, die aber in so engem Zusammenhang mit dem Vorhergehenden stehen, dass ich sie an dieser Stelle nicht missen möchte.

Im Jahre 1908/09 haben Ebert und Kurz[1]) erfolgreich versucht, die luftelektrische Zerstreuung in unmittelbarer Nähe des Erdbodens zu registrieren. In eine kleine Grube im Erdboden von 40 cm Länge, 30 cm Breite und 10 cm Tiefe, deren Seitenwände mit Blech ausgekleidet waren, wurde zu diesem Zweck eine Zerstreuungsplatte von 30 cm Länge und 20 cm Breite derart eingesenkt, dass sie dem Grubenboden in 5 cm Entfernung parallel und gut gegen Erde isoliert, gegenüberstand. Nach obenhin war die Öffnung durch einen Blechdeckel abgedeckt, der aus zwei Teilen bestand, die so gegeneinander geschoben werden konnten, dass sie in der Mitte

[1]) H. Ebert und K. Kurz, Registrierungen der luftelektrischen Zerstreuung in unmittelbarer Nähe des Erdbodens. Sitzungsberichte der Bayer. Akademie, Bd. 25, 2. Abhandlung, 1909.

etwas übereinander griffen. Hier waren sie halbkreisförmig ausgeschnitten, so dass eine 12 cm im Durchmesser haltende Öffnung frei blieb. Auf die Deckel selbst waren zwei halbzylindrische Schutznetze aufgelötet, welche beim Zusammenschieben eine Schutzwirkung gegen elektrische Influenz bildeten. Die Zerstreuungsplatte wurde automatisch geladen, ihr Spannungsrückgang als ein Mass für die Zerstreuung photographisch registriert.

Zur Beurteilung der sich zwischen der Platte und ihrer geerdeten Umgebung infolge der Plattenladung ausbildenden elektrischen Strömung ist es von Wichtigkeit, die Verteilung von Niveauflächen und Kraftlinien in den Zwischenräumen festzustellen. Dieselbe ist natürlich verschieden je nach der auf der Platte befindlichen Elektrizitätsmenge. Indessen werden die einzelnen Bilder doch einander ähnlich sein, so dass es genügt, sich in dem Felde zu orientieren für diejenige Spannung, welche bei den meisten Registrierungen als Ausgangsspannung gedient hatte: 60 Volt.

Da ich gerade zu jener Zeit mit dem experimentellen Teil der vorliegenden Arbeit beschäftigt war, habe ich auf Anregung von Herrn Professor Ebert gerne die Ausmessung dieses Kraftfeldes übernommen.

Ich fertigte zu diesem Zweck einen flachen Metallkasten von den Dimensionen der Grube ($40 \times 30 \times 10$ cm), der mit denselben Deckeln abgedeckt wurde wie die Grube. Innerhalb dieser Metallumhüllung wurde die bei den Registrierungen verwendete Zerstreuungsplatte in genau derselben Höhe und Lage befestigt wie bei den Versuchen und dieselbe mit einer 30zelligen Akkumulatorenbatterie, deren einer Pol geerdet war, geladen. Eine der Längswände des Kastens bestand aus zwei längeren Blechstreifen, die so gegeneinander gestellt wurden, dass zwischen ihnen ein vertikaler schmaler Spalt offen blieb, der an die verschiedensten Stellen des Kastens gerückt werden konnte. Durch diesen Spalt wurde die Sonde des Wasserspritzkollektors eingeführt.

Diagramm 25

zeigt das Ergebnis der auf diese Weise vorgenommenen Abtastung. Man sieht, dass das Feld unter der Platte vollkommen homogen ist bis auf einen Randstreifen von etwa 2 cm Breite, so dass man nur einen geringen Fehler begeht, wenn man die vom Erdboden in die Platte übergehende elektrische Gesamtströmung durch den Flächenraum der Platte dividiert, um einen Mittelwert der pro Quadratzentimeter eintretenden Strommenge, die Stromdichte, zu erhalten.

Eine zweite Untersuchung bezog sich auf das Studium des elektrischen Kraftfeldes im Gerdienschen[1]) Apparat, der dazu dient, die Leitfähigkeit im absoluten Maße zu bestimmen. Dieser im Prinzip bereits von Mc. Clelland[2]) zur Bestimmung der Leitfähigkeit von Flammengasen verwendete Apparat besteht im wesentlichen aus einem Zylinderkondensator. Die äussere geerdete Elektrode hat einen verhältnismässig grossen Durchmesser (16 cm) und eine Länge von 41 cm. Die innere geladene und mit einem Elektroskop verbundene Elektrode hat nur eine Länge von 25,4 cm und einen Durchmesser von 1,5 cm. Die beiden Elektroden sind konaxial angeordnet und ist die innere an einem isoliert eingeführten Metallstäbchen befestigt.

Durch eine kleine Turbine, die an einem Ende der äusseren Elektrode angeordnet ist, wird nun Luft durch den Raum zwischen Aussen- und Innenelektrode gesaugt. Hält man Ladespannung und Luftgeschwindigkeit in gewissen durch die Theorie gebotenen Grenzen, so arbeitet der Apparat mit ungesättigtem Strome und der Potentialrückgang im Elektroskop ist eine einfache Funktion der Leitfähigkeit.

Die Theorie, welche bereits Mc. Clelland bis zu einem gewissen Grad der Vollkommenheit entwickelt hat und auf

[1]) H. Gerdien, Ein neuer Apparat zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit der Luft, Nachrichten der Göttinger Gesellschaft der Wissenschaften, mathem. physikal. Klasse 240, 1905.

[2]) Mc. Clelland, On the Conductivity of the Hot Gases from Flames, Phil. Mag. (5) 46, 29, 1898.

die hier nicht weiter eingegangen werden soll, lehrt, dass die Leitfähigkeit bis auf eine Apparatkonstante dem Logarithmus des Spannungsrückgangs proportional ist.

Allerdings wurde bei dieser Ableitung für die Bestimmung des Potentialgefälles zwischen den beiden Elektroden eine Formel benützt, wie sie nur für zwei unendlich lange konaxiale Zylinder gilt. Diesen Kompromiss sollte man sich bei der Benützung der oben angegebenen Beziehung stets vergegenwärtigen; denn dass die Abweichungen des tatsächlichen Niveaulinienverlaufs von den Annahmen der Theorie doch recht beträchtliche sind, lehrt

Diagramm 26.

Um dasselbe zu erhalten war ich gezwungen, den äusseren Zylinder durch ein Drahtnetz zu ersetzen und die Ordinaten der fraglichen Punkte durch graphische Interpolationen zu ermitteln, wie dies schon ähnlich bei der Abtastung des Kraftfeldes im Elster- und Geitelapparat mit Schutzzylinder geschehen war.

Das Diagramm lässt ausser den schon besprochenen Abweichungen des Niveaulinienverlaufs von dem durch die Theorie vorausgesetzten auch noch eine recht unangenehme Störung durch das Stäbchen erkennen, auf das die innere Elektrode aufgesteckt ist. Man wird sich also nicht wundern dürfen, wenn einst ein vollkommenerer Apparat die mit dem Gerdienschen gewonnenen Werte für die Leitfähigkeit zwar nicht um 50 oder 100, vielleicht aber um 20 oder 30 % korrigiert.

III.

Der Drachen und das Luftschiff im homogenen elektrischen Feld.

1. Der Drachen.

Um Potential- oder Leitfähigkeitsmessungen in grösseren Höhen auszuführen, muss man sich entweder des Kugelballons, des Drachens oder des Luftschiffes bedienen. Der

Kugelballon ist, wie schon früher erwähnt, bereits von Ebert und Lutz einer eingehenden experimentellen, von Schiötz, Linke und Benndorf einer ausführlichen theoretischen Behandlung unterworfen worden; ich unterliess es daher, das Problem nochmals aufzugreifen. Nächst dem Kugelballon ist wohl der Drachen das einfachste und auch ausgebildetste Mittel, Messapparate in grössere Höhen zu befördern. Er erfreut sich in der Meteorologie in dieser Hinsicht bereits eines gewissen Rufes. Freilich hat der Drachen einen Mangel, der seine Anwendungsfähigkeit bedeutend einschränkt. Während man mit einem gefesselten Kugelballon auch auf einem verhältnismässig kleinen Versuchsfeld arbeiten kann, begegnet dies beim Drachen Schwierigkeiten. Aus diesem Grunde haben auch die in der luftelektrischen Station Gräfelfing von Herrn Dr. Dieckmann geplanten Versuche, den Drachen als Träger von Kollektoren zu benützen, einen günstigen Abschluss noch nicht gefunden. Zu diesen Versuchen sollten die im folgenden beschriebenen vorbereiten.

Als Drachenmodell verwendete ich die im Maßstab 1 : 20 in Metall ausgeführte Nachbildung eines der Station zur Verfügung gestellten Militärdrachens, der den Radiotelegraphisten zum Hochbringen der Antennen gedient hatte. Die beschränkte Höhe des künstlichen Feldes zwang leider zu einem verhältnismässig kleinen Leitseil, doch lassen die erhaltenen Diagramme das prinzipiell Wichtige recht gut erkennen, wenn auch ihre quantitative Ausbeute dadurch an Bedeutung verliert.

Diagramm 27

zeigt zunächst den geerdeten Drachen im homogenen Feld. Die Niveaulinien gehen, wie die Theorie es erfordert, sämtlich über den Drachen hinweg. Charakteristisch sind dabei die Nasen, welche sie bilden, um die Ebene möglichst lückenlos zu überdecken. In

Diagramm 28

ist der Drachen samt Leitseil vom Boden isoliert, er nimmt durch Influenz ein etwa dem Mittelpunkt seines Leitseils

entsprechendes Potential an. Den für die Praxis am meisten in Betracht kommenden Fall repräsentiert entschieden

Diagramm 29.

Die Drachenspitze trug hier während der Abtastung einen winzigen Poloniumkollektor, der aus einer kleinen Locke polonisierten Platindrahtes bestand. Man erkennt durch Vergleich mit den Diagrammen 27 und 28 seine Wirkung in der anschaulichsten Weise. Zu beachten ist, dass das aufgeladene Leitseil das Gefälle oberhalb des Drachens in keiner Weise stört, man kann also in der Praxis, wenn man nur eine gut isolierte Winde und einen rasch wirkenden Kollektor verwendet, getrost das mittlere Gefälle gleich dem Quotienten aus abgelesener Spannung und Drachenhöhe setzen.

2. Das Luftschiff.

Die zunehmenden Erfolge der Luftschiffahrt liessen es berechtigt erscheinen, auch das Luftschiff einer Untersuchung im homogenen Feld zu unterwerfen.

Als man nach dem Unglück von Echterdingen am 5. August 1908 im elektrischen Erdfeld die Urheberin der Katastrophe vermutete, war die Frage nach der Deformation der Niveauflächen eines homogenen Feldes durch Luftschiffe brennend geworden. Von der Seite der Physiker gaben wohl zuerst Dr. Linke und Professor Pfaundler[1]) als Ursache der Zündung die Luftelektrizität an. Etwas später hat sich Herr Dr. Dieckmann[2]) genauer über diesen Gegenstand ausgelassen. Er wies in einem Aufsatz: „Gefährdung von Luftschiffen durch atmosphärische Elektrizität“ an der Hand kleiner, nach dem Gefühl gezeichneter Skizzen, die den Verlauf der Niveauflächen um das Luftschiff wiedergaben, auf die kritische Situation hin, in der sich ein Kreuzer immer dann befindet, wenn sich bei Anwesenheit von Knallgas in seiner Nähe hohe elektrische Gefälle ausbilden.

[1]) Beilage der Münchner Neuesten Nachrichten, Nr. 43, 1908.

[2]) M. Dieckmann, Gefährdung von Luftschiffen durch atmosphärische Elektrizität, Prometheus, Jahrg. 19, 785.

In einem Vortrag auf der internationalen Luftschiffahrtsausstellung in Frankfurt hat dann auch Herr Professor Ebert[1]) an der Hand von fünf durch mich ausgemessene Diagramme seine Meinung über dieses Thema öffentlich kund getan. Ich will mich darauf beschränken hier jenes Diagramm von den fünfen zu diskutieren, welches am ehesten einen quantitativen Schluss zulässt. Ich glaube um so mehr die anderen vernachlässigen zu dürfen, als Herr Dr. Dieckmann in einem demnächst zur Veröffentlichung kommenden Schriftchen auf die in diesen Diagrammen behandelten Fälle näher eingehen wird.

Das zu diesen Untersuchungen benützte Modell bestand aus der bronzierten Nachbildung eines Zeppelin-Kreuzers aus Holz (Maßstab 1 : 250), Dieses Modell wurde durch einen Stahlstab von der Rückseite aus in das Feld gehalten, so zwar, dass seine Achse in die Vertikallängsmittelebene zu liegen kam.

Diagramm 30

zeigt den Verlauf einer Anzahl von Niveaulinien für den Fall, dass dieses Modell, verbunden mit der unteren Platte, einen Winkel von 30° mit dem Erdboden bildet. Eine derartige Stellung entspricht etwa dem Fall, dass das am Hinterteil verankerte Luftschiff dem Einfluss des Windes ausgesetzt ist. Da der Abstand der untersten gezeichneten Niveaufläche vom Erdboden im ungestörten Feld etwa elfmal so gross ist als der Abstand derselben Niveaufläche von der Spitze des Luftschiffes, so ergibt sich, dass bei einem Gefälle von 1000 Volt/m, wie es bei Gewitterstimmung ja leicht vorkommt, der Gradient über dem Luftschiff 11000 Volt/m beträgt. Hieraus ergibt sich eine Flächendichte von

$$s = -\frac{\frac{dV}{dh}}{4\pi} = -\frac{110}{300 \cdot 12{,}6} = -2{,}62 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{ESE/cm^2}$$

[1]) H. Ebert, Luftelektrizität, Wissenschaftl. Vorträge auf der Internationalen Luftschiffahrtsausstellung (Ila) in Frankfurt.

und ein elektrostatischer Druck von

$$p = 2\pi s^2 = 43{,}1 \cdot 10^{-4}\ \text{Dyn/cm}^2 = 43{,}1\ \text{Dyn/m}^2.$$

Diese Grössen können an Teilen mit besonders starker Krümmung, also etwa an den Steuern, noch sehr viel grösser werden und es wäre dann nicht unmöglich, dass an solchen Stellen ein Austritt der Elektrizität unter Glimmlichterscheinungen stattfinden würde. Freilich sind unsere Kenntnisse über die Zündungsfähigkeit solcher stiller Entladungen noch so lückenhaft, dass man etwas Abschliessendes über die Sache zurzeit kaum sagen kann.

Ich glaube in der vorliegenden Arbeit gezeigt zu haben, dass die von Ebert und Lutz begründete Methode der Felderforschung ein überaus brauchbares und vielseitiges Mittel zum Studium luftelektrischer Messanordnungen und Apparaturen ist, insbesondere hoffe ich, durch eine gründliche Diskussion der Fehlerquellen die Bedenken, welche man gegen den quantitativen Wert der Diagramme vorgebracht hat, beseitigt zu haben.

Das künstliche homogene Feld ist eine so wohlfeile Anordnung, dass ihm in jedem Institut, in dem man sich mit luftelektrischen Messungen beschäftigt, ein ständiger Platz eingeräumt werden sollte.

Zum Schluss möchte ich mir noch erlauben, dem Vorstand des Physikalischen Instituts der Technischen Hochschule München, Herrn Professor Dr. H. Ebert, sowie Herrn Privatdozent Dr. M. Dieckmann für die vielseitigen Anregungen und freundlichen Unterstützungen bei der vorliegenden Arbeit meinen herzlichsten Dank auszusprechen.

München, im Juli 1911.

Karl Hoffmann.

Fig. 1.

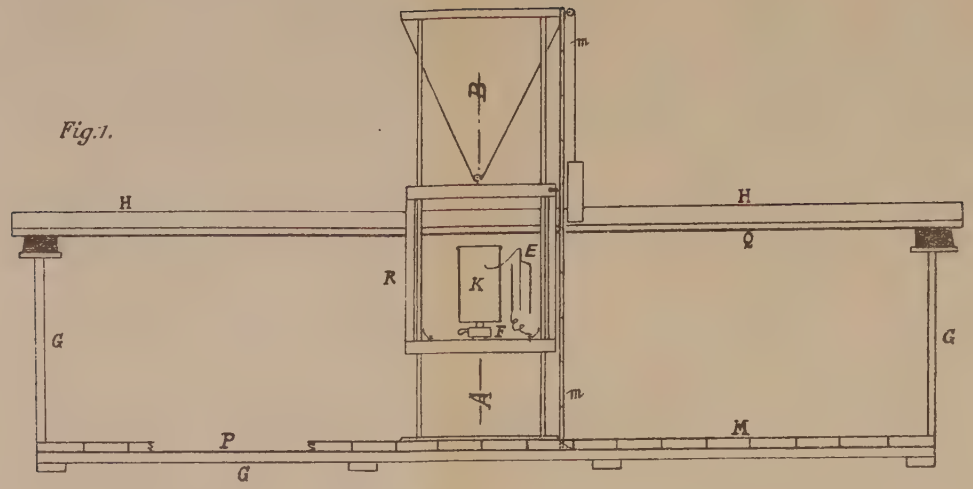


Fig. 2. Schnitt A–B

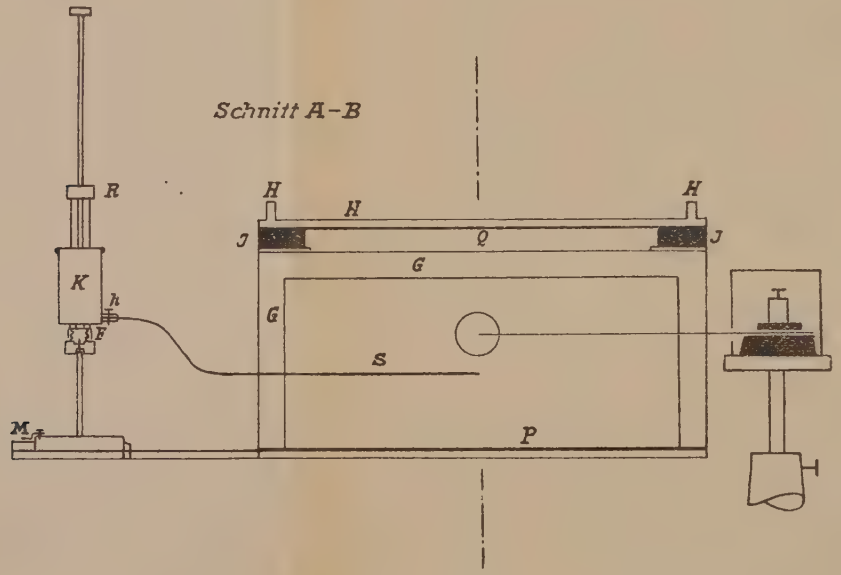


Fig. 3. Aichkurve des verwendeten Lutz-Edelmann'schen Saitenelektrometers.
⅓ Originalgröße.

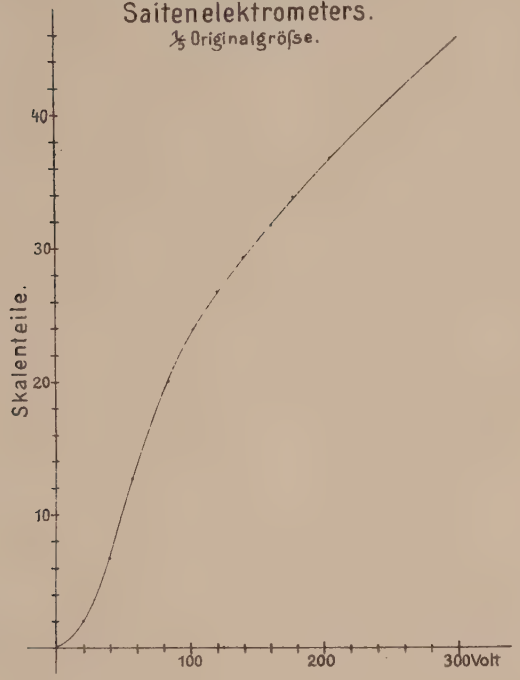


Fig. 4. Graphische Darstellung des Spannungabfalles zwischen den beiden Platten P und Q.

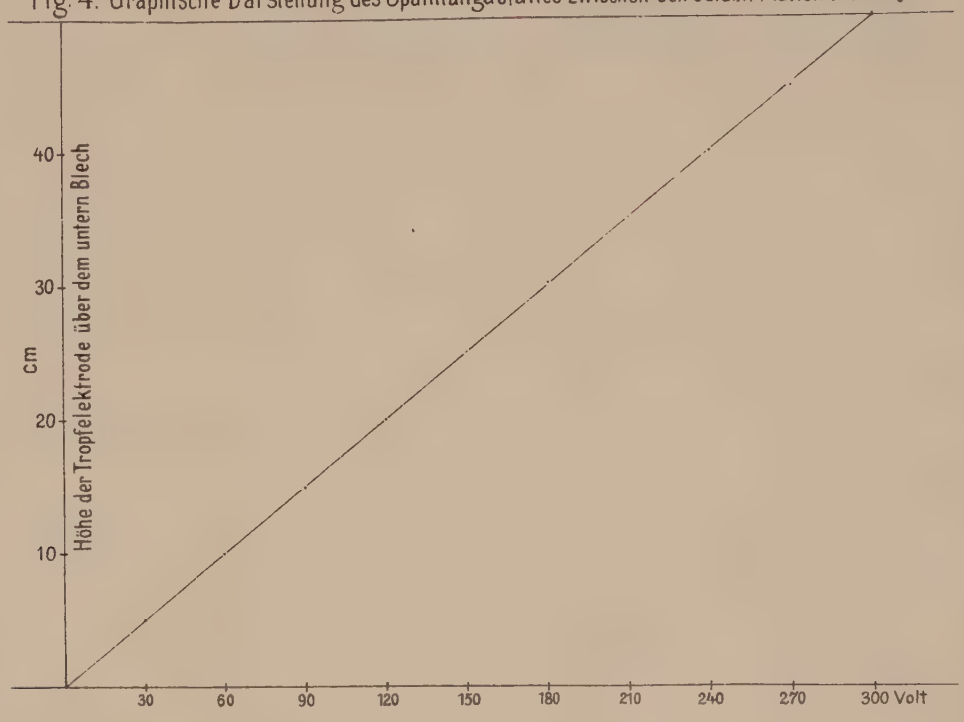


Fig. 5.

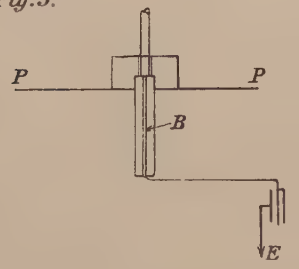
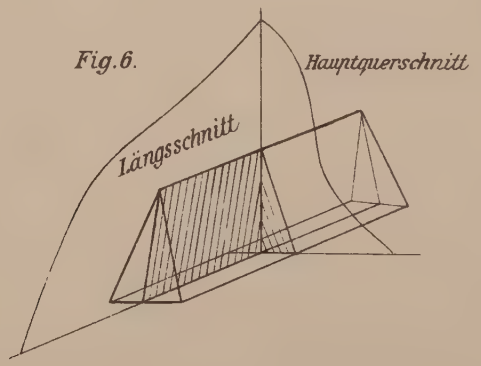


Fig. 6.



Autor del.

Reprod. Hubert Köhler, München.

Diagramm 1.
Berechneter Verlauf der Niveaufl. um eine Halbkugel v. 10 cm. ⌀

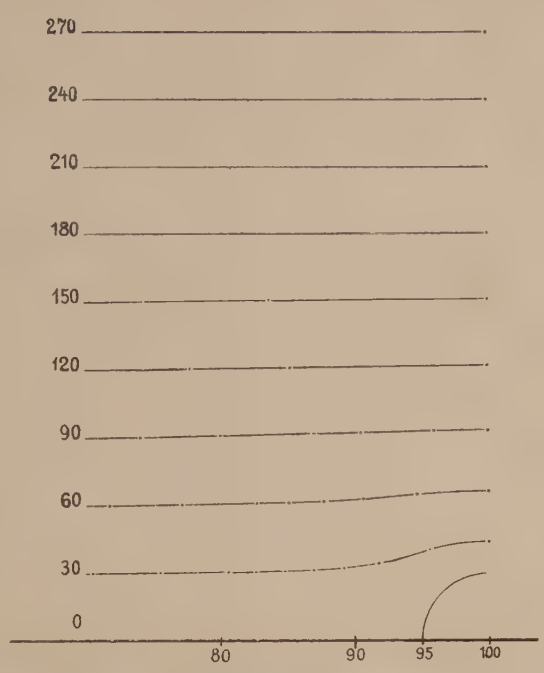


Diagramm 2.
Beobachteter Verlauf der Niveaufl. um eine Halbkugel v. 10 cm ⌀

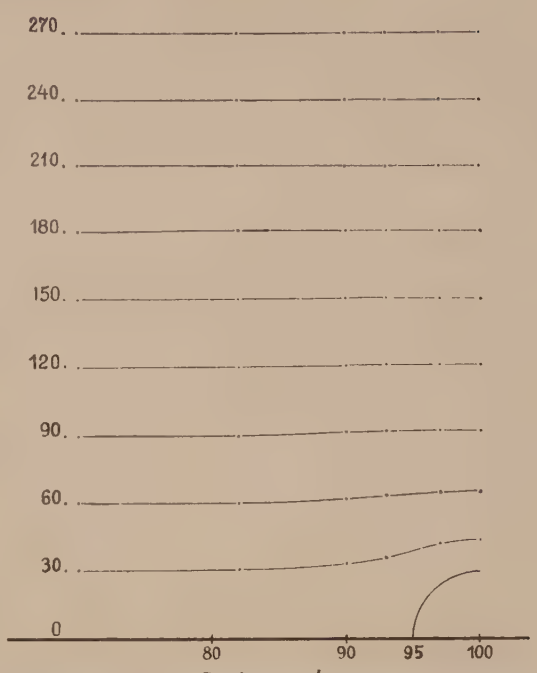


Diagramm 3.
Berechneter Verlauf der Niveaufl. um eine Halbkugel v. 20 cm. ⌀

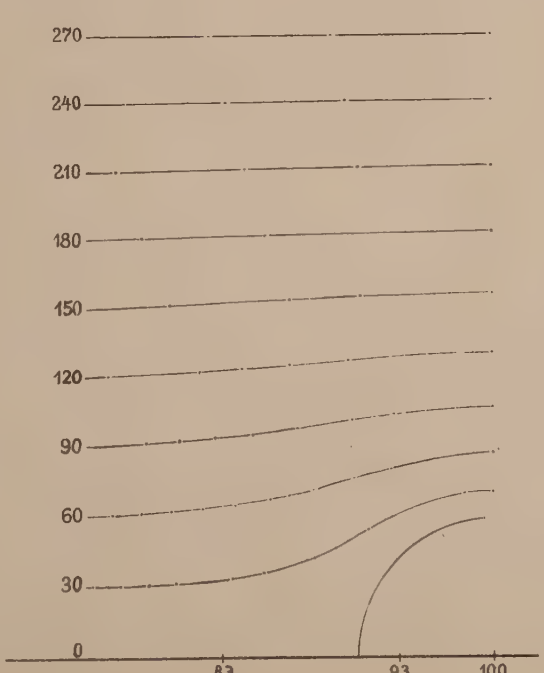
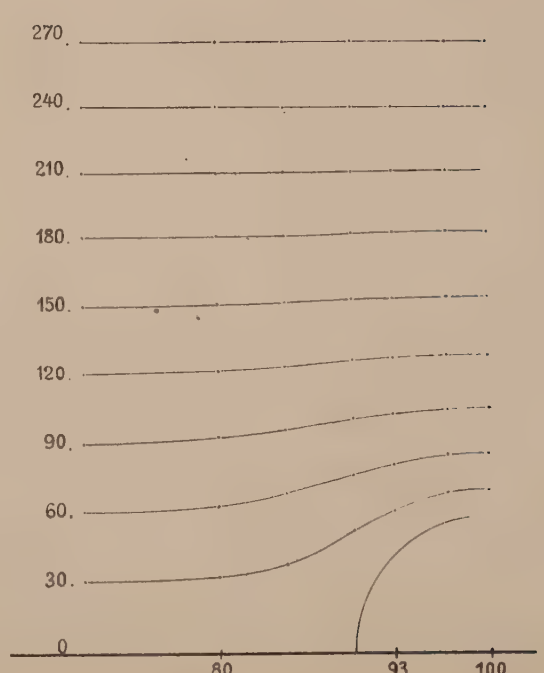


Diagramm 4.
Beobachteter Verlauf der Niveaufl. um eine Halbkugel v. 20 cm. ⌀



Autor del.

Reprod. Hubert Köhler, München.

Diagramm 5.
Kegel von 30° Öffnungswinkel im homog. Feld.

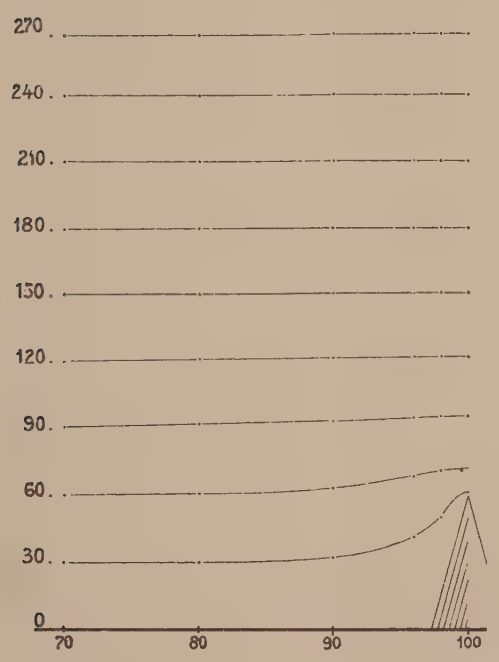


Diagramm 6.
Kegel von 60° Öffnungswinkel im homog. Feld.

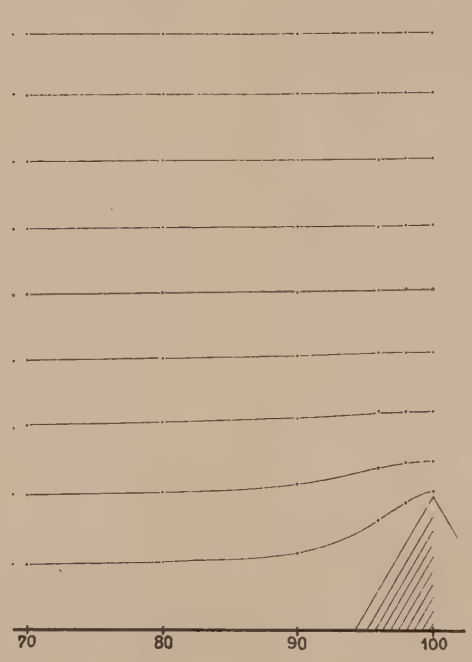
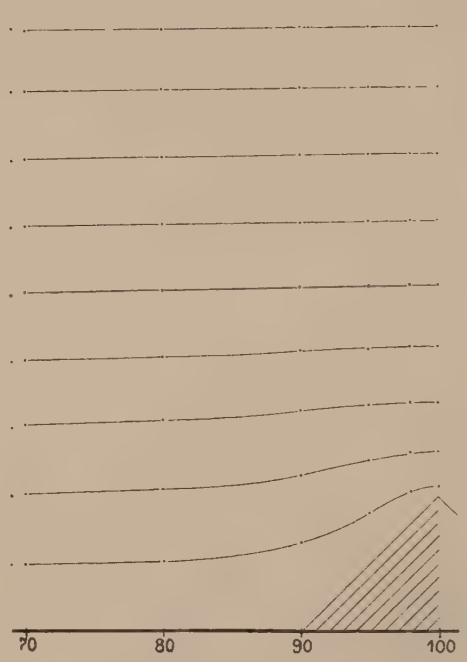
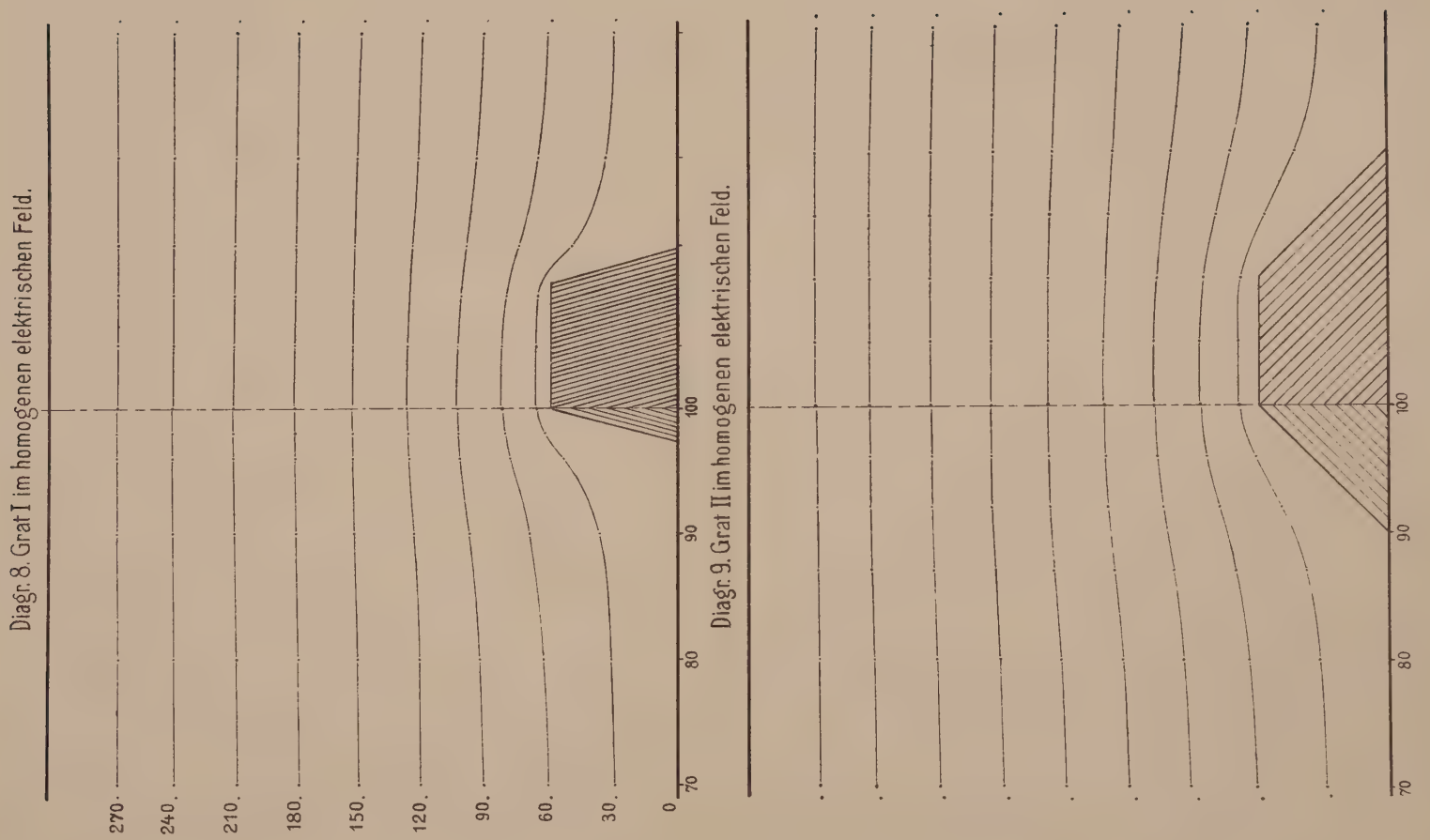
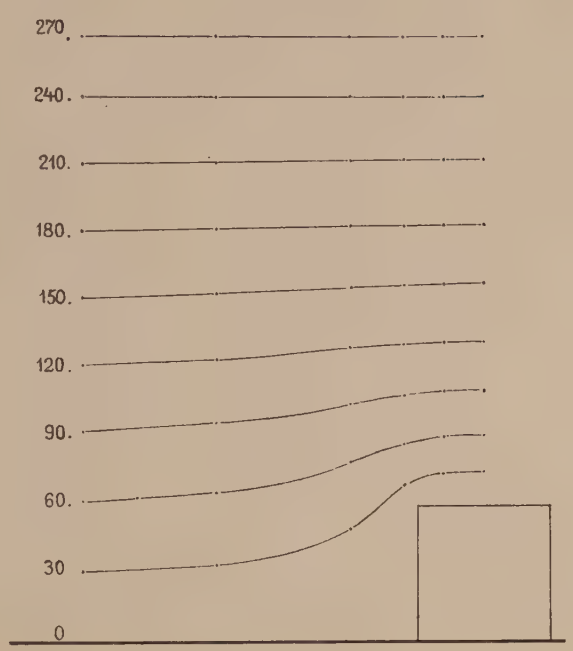


Diagramm 7.
Kegel von 90° Öffnungswinkel im homog. Feld.

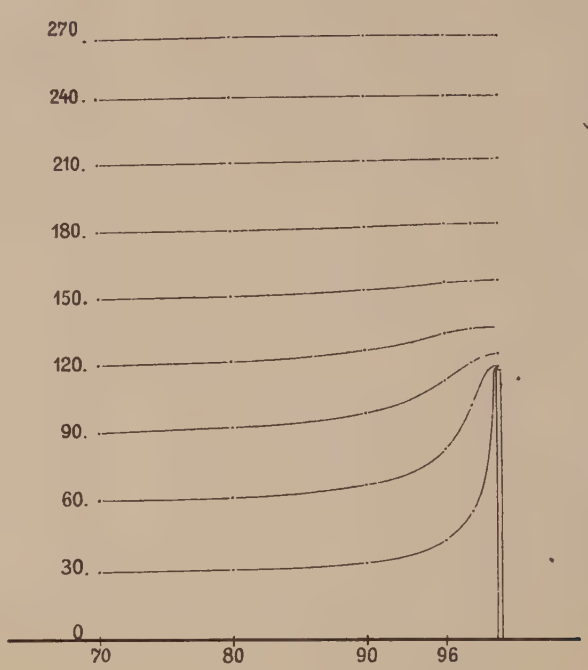



Diagr. 8. Grat I im homogenen elektrischen Feld.
270.
240.
210.
180.
150.
120.
90.
60.
30.
0
70
80
90
100
Diagr. 9. Grat II im homogenen elektrischen Feld.
70
80
90
100

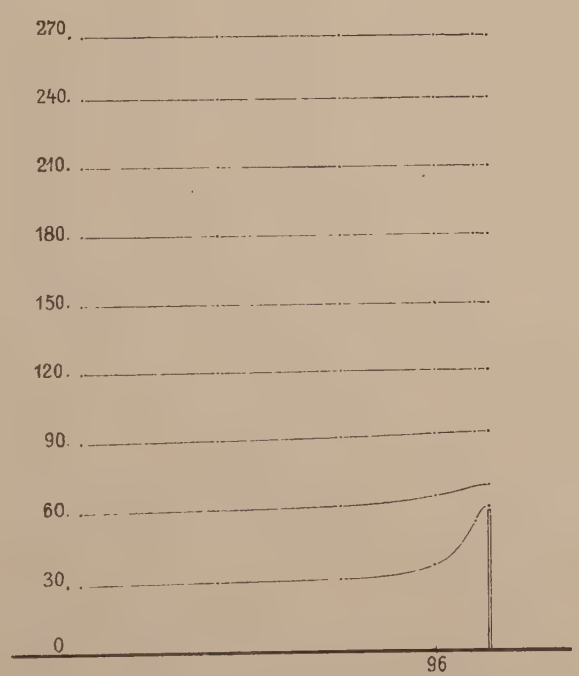
Diagr. 10. Der Würfel im homogenen Feld.



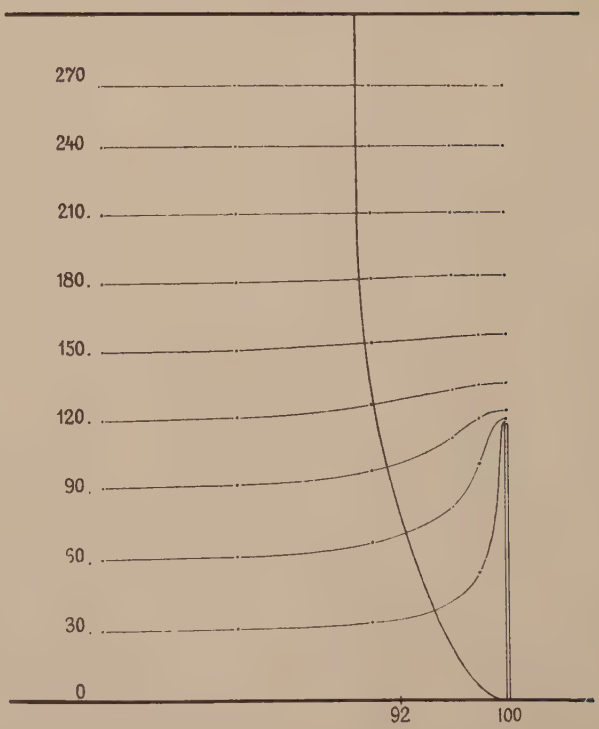
Diagr. 11. Geerdete Stange im homogenen Feld.



Diagr. 12. Geerdete Stange im homogenen Feld.



Diagr. 13. Geerdete Stange im homogenen Feld.

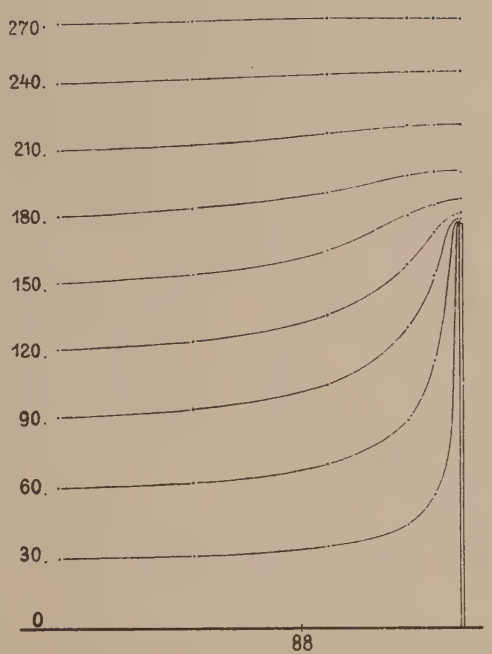


Autor del.

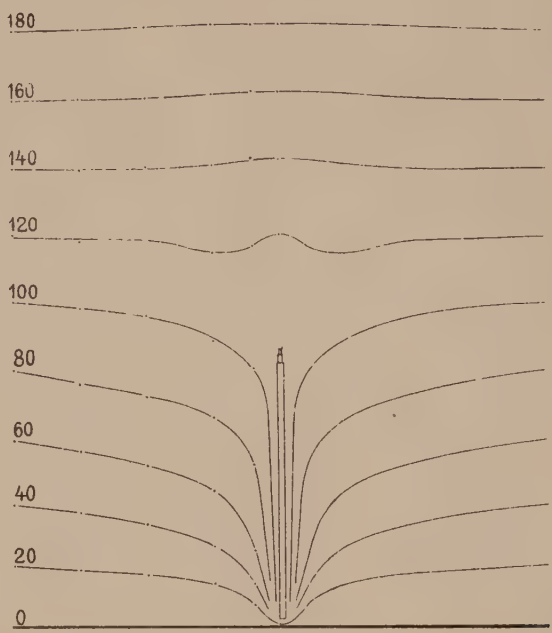
Reprod. Huber Köhler, München.

Autor del.

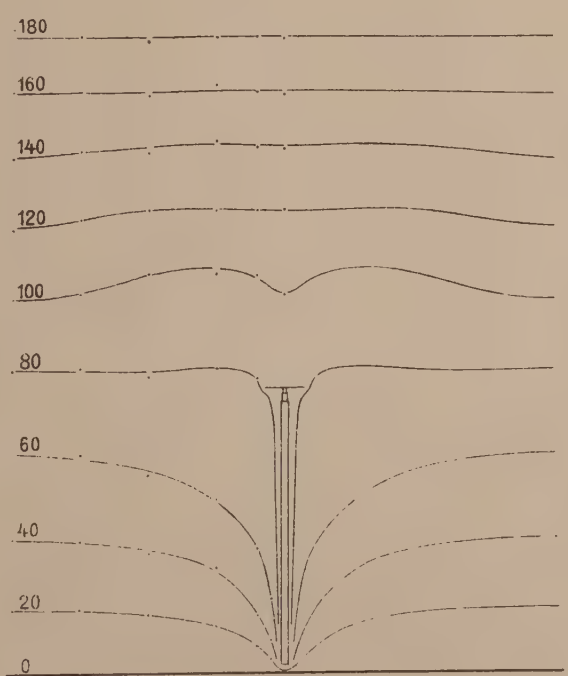
Diagr. 14. Geerdete Stange im homogenen Feld.



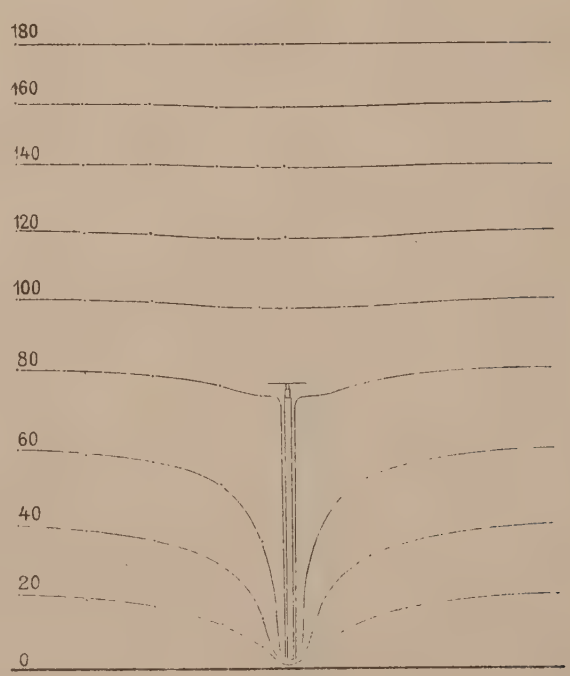
Diagr. 15. Jsolierte Stange mit Flammenkollektor.



Diagr. 16. Jsolierte Stange mit Poloniumkollektor ohne Wind.

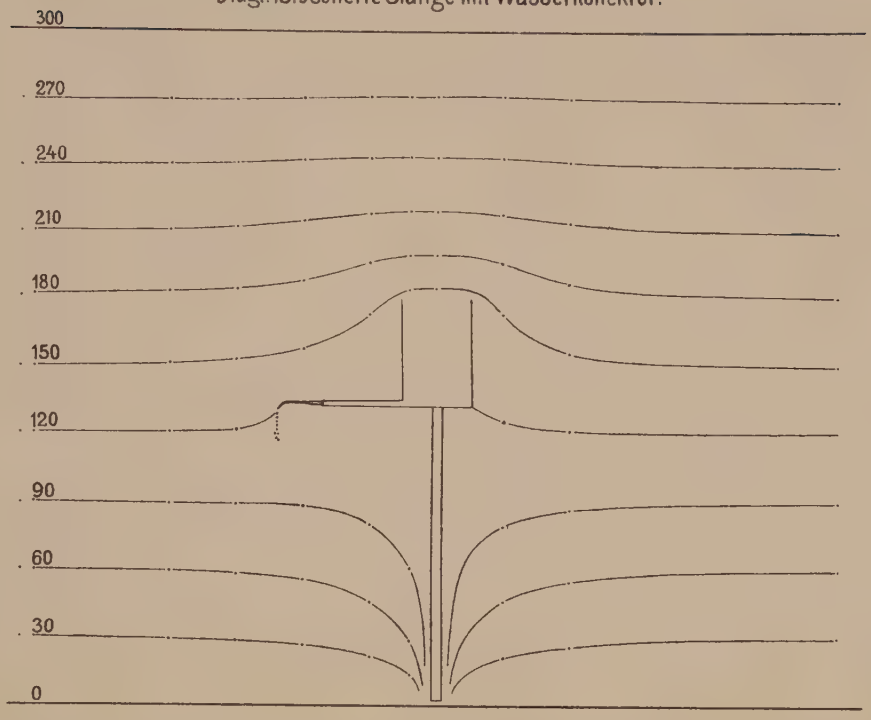


Diagr. 17. Jsolierte Stange mit Poloniumkollektor und Wind.

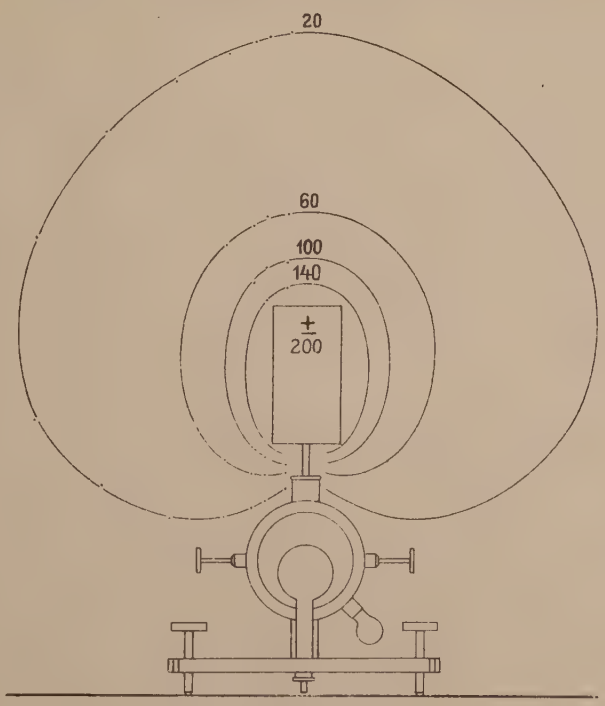


Reprod. Huber-Köhler, München.

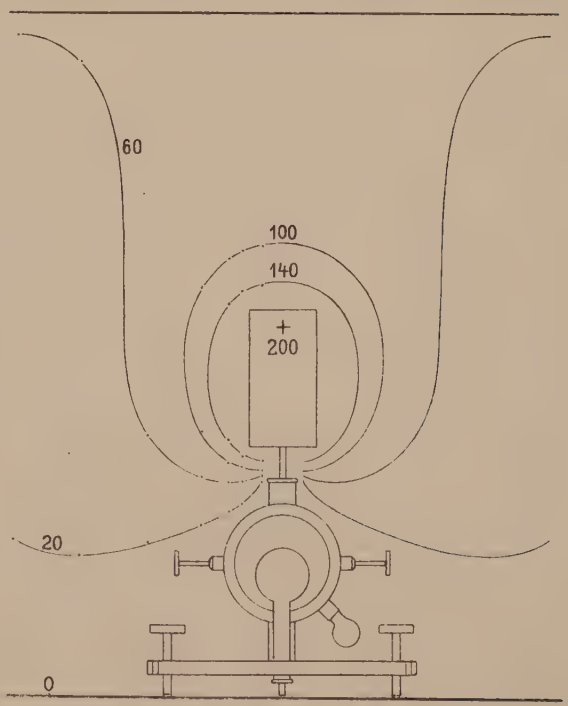
Diagr. 18. Isolierte Stange mit Wasserkollektor.



Diagr. 19. Der Elster und Geitel'sche Zerstreuungsapparat.

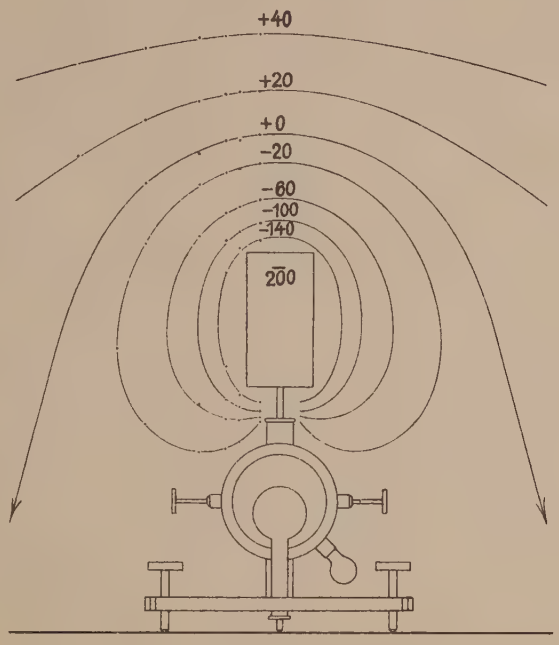


Diagr. 20. Der + geladene Zerstreuungsapp. im homog. Feld.

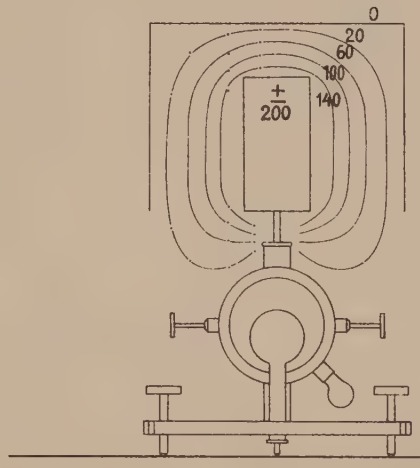


Autor del.
Reprod. Hubert Köhler, München.

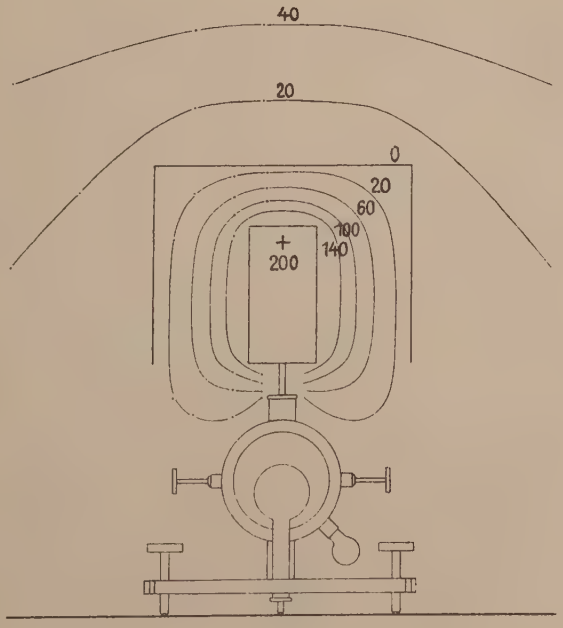
Diagr. 21. Der – geladene Zerstreuungsapparat im homog. Feld.



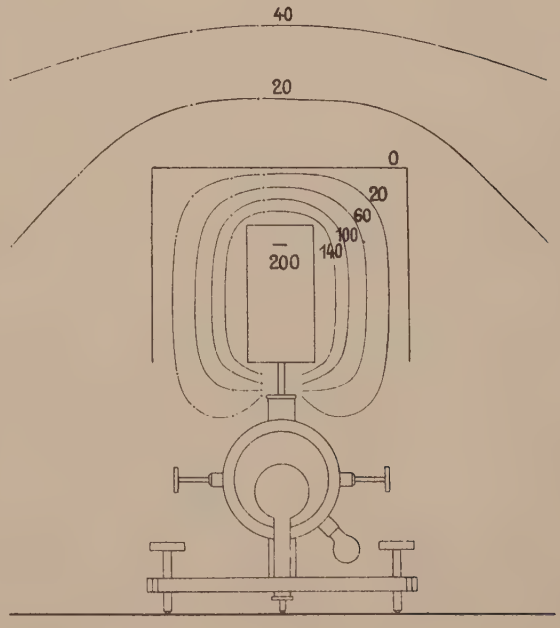
Diagr. 22. Der Zerstreuungsapparat mit Schutzzylinder im Zimmer.



Diagr. 23. Der + geladene Zerstreuungsapp. mit Schutzzyl. i. homog. Feld.



Diagr. 24. Der – geladene Zerstreuungsapp. mit Schutzzyl. i. homog. Feld.



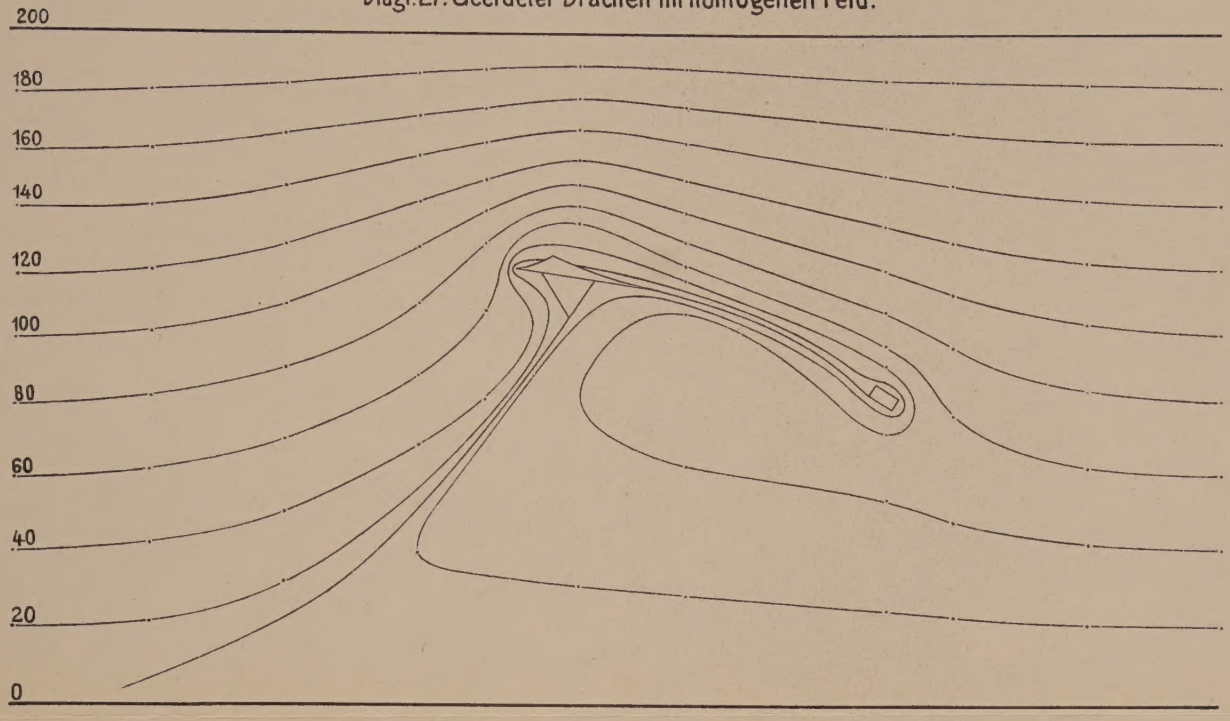
Autor del.

Regenrad Hubert Kühler, München.

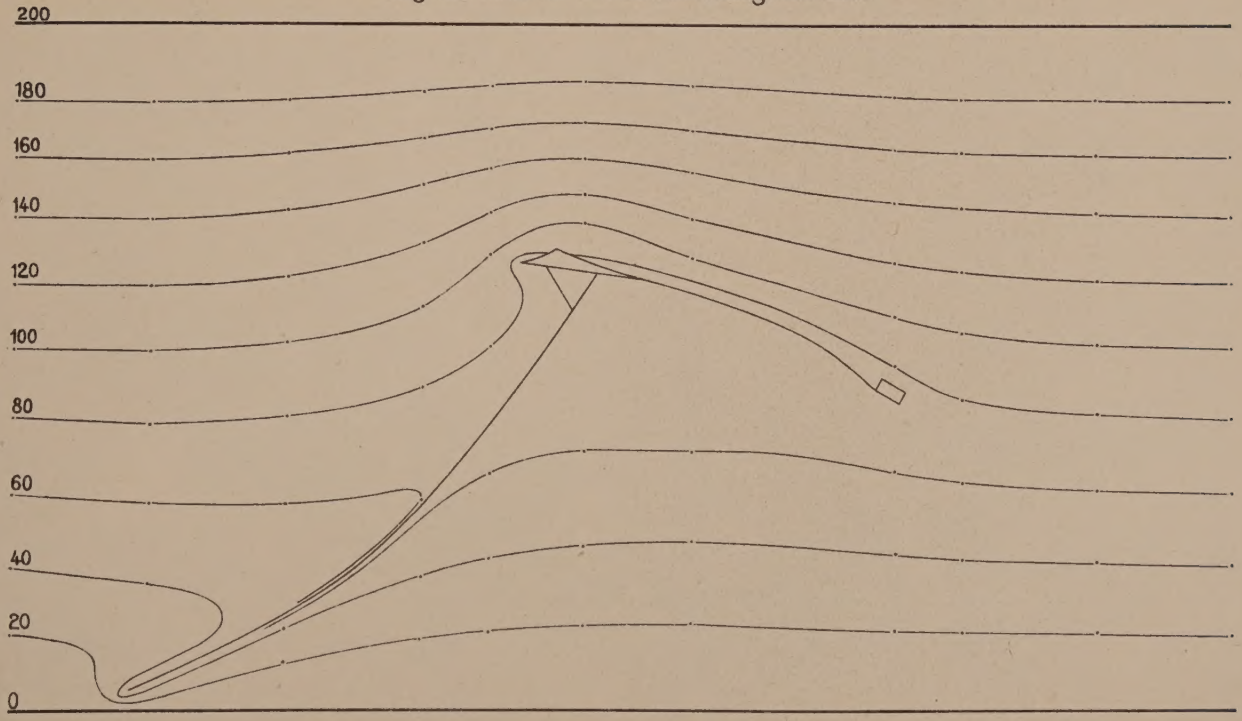
Diagr. 25. Kraftfeld des Ebert und Kurz'schen Apparates zur Bestimmung d. elektr. Zerstreuung in der Nähe d. Erdbodens.

Diagr. 26. Kraftfeld des Gerdien'schen Apparates zur Bestimmung der Leitfähigkeit.

Diagr. 27. Geerdeter Drachen im homogenen Feld.



Diagr. 28. Isolierter Drachen im homogenen Feld.



Autor del.
Reprod. Huber & Köhler, München.